

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

VENTILAČNÍ VÝPOČTY V SYNCHRONNÍM STROJI

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

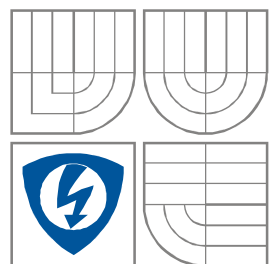
Bc. JAN JUDAS

BRNO 2012



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

VENTILAČNÍ VÝPOČTY V SYNCHRONNÍM STROJI

VENTILATION CALCULATIONS IN SYNCHRONOUS MACHINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

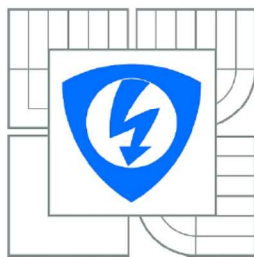
Bc. JAN JUDAS

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. MARCEL JANDA, Ph.D.

BRNO, 2012



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Jan Judas

ID: 104195

Ročník: 2

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Ventilační výpočty v synchronním stroji

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s prostředím Ansys CFX a vytvořte modely několika ventilátorů.
2. Sestrojte model synchronního stroje v prostředí Autodesk Inventoru.
3. Vytvořte model proudění chladicího média elektrickým strojem s vytvořenými typy ventilátorů.
4. Vyhodnoťte výsledky výpočtů a porovnejte je.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího

Termín zadání: 21.9.2011

Termín odevzdání: 21.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Marcel Janda, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Cílem práce bylo seznámení se s prostředím práce Ansys CFX, vytvoření několika modelů ventilátorů a modelu synchronního stroje v Autodesk Inventor, vytvoření modelu proudění chladicího média strojem s vytvořenými ventilátory a vyhodnocení výsledků. Práce nejdříve popisuje samotný synchronní stroj, ztráty v něm, tok výkonu synchronním strojem a způsoby jeho chlazení. Dále popisuje jednotlivé typy přenosu tepla, laminární a turbulentní proudění. Věnuje se i rozdělení ventilátorů a programu používanému pro výpočet proudění Ansys CFX včetně metody, kterou k výpočtu používá. Práce popisuje jednotlivé modifikace ventilátorů a nastavení výpočtu v programu Ansys. Poté zobrazuje výsledky analýzy zadaného ventilátoru pro různé počty lopatek a pro jeho různé modifikace. Vybrané modifikace pak analyzuje vzhledem k měnícím se otáčkám. V poslední kapitole pak zobrazuje analýzu proudění ve stroji se třemi různými ventilátory. Především je zde zobrazován hmotnostní tok, tlak a jejich rozložení na vyhodnocovacích plochách.

Abstract

The aim of the project was to get familiar with the environment of ANSYS CFX, create several models of fans and synchronous machine model in Autodesk inventor, create model of cooling medium flow through the machine with these fans and evaluation of results. Firstly the thesis describes the synchronous machine itself, losses of the machine, the flow of power of synchronous machine and methods of its cooling. Next the thesis describes each kind of heat transfer, laminar and turbulent flow. The thesis also refers of kind of the fans and the program used to calculate the flow Ansys CFX, including the method that Ansys used to calculate. The work describes the individual modification of fans and setting of calculation in ANSYS. Then displays the results of the analysis these fans for different numbers of fan blades and for modification of the fan. Then the thesis analyzes selected modifications due to changing speed. In the last chapter shows the analysis of flow in the machine with three different fans. In particular, there is shown the mass flow rate, pressure and its distribution on areas for evaluation.

Klíčová slova

Ansys CFX, hmotnostní tok, lopatka, otáčky, plocha, proudění, radiální, synchronní stroj, tlak, ventilátor

Keywords

Ansys CFX, mass flow rate, blade, rotation, area, flow, radial, synchronous machine, pressure, fan

Bibliografická citace

JUDAS, J. *Ventilační výpočty v synchronním stroji*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2012. 66 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marcel Janda, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Ventilační výpočty v synchronním stroji jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Marcel Janda, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé semestrální práce.

V Brně dne

Podpis autora



OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	11
ÚVOD.....	13
1 SYNCHRONNÍ STROJ.....	14
1.1 VÝKONOVÉ ROZDĚLENÍ.....	15
1.1.1 TOK VÝKONU SYNCHRONNÍHO STROJE	15
1.2 ZPŮSOBY CHLAZENÍ SYNCHRONNÍCH STROJŮ	16
2 SDÍLENÍ TEPLA A VENTILACE	19
2.1 PŘENOS TEPLA	19
2.1.1 SDÍLENÍ TEPLA VEDENÍM.....	19
2.1.2 SDÍLENÍ TEPLA PROUDĚNÍM.....	19
2.1.3 SDÍLENÍ TEPLA SÁLÁNÍM	20
2.2 PROUDĚNÍ Z HLEDISKA SMĚRU A RYCHLOSTI	20
2.2.1 LAMINÁRNÍ PROUDĚNÍ	22
2.2.2 TURBULENTNÍ.....	23
2.3 VENTILÁTORY.....	25
2.3.1 ROZDĚLENÍ VENTILÁTORŮ	25
2.4 ANSYS CFX – POSTUP PŘI VÝPOČTU PROUDĚNÍ	26
2.4.1 METODA KONEČNÝCH OBJEMŮ.....	27
3 VÝPOČTY PROUDĚNÍ VENTILÁTORU.....	28
3.1 MODEL VENTILÁTORU A JEHO MODIFIKACE.....	28
3.2 NASTAVENÍ A VÝPOČET PROUDĚNÍ VENTILÁTORU V ANSYS CFX.....	30
3.3 PROUDĚNÍ VENTILÁTORU PRO RŮZNÉ POČTY LOPATEK.....	32
3.4 PROUDĚNÍ VENTILÁTORU PRO RŮZNÉ TVARY VENTILÁTORU	36
3.5 PROUDĚNÍ VENTILÁTORŮ PRO RŮZNÉ OTÁČKY	40
4 PROUDĚNÍ V SYNCHRONNÍM GENERÁTORU	45
4.1 NASTAVENÍ A VÝPOČET PROUDĚNÍ V GENERÁTORU V ANSYS CFX	46
4.2 VÝSLEDKY A VYHODNOCENÍ PROUDĚNÍ V GENERÁTORU.....	47
4.2.1 Hmotnostní tok vypočtený z rychlosti	47
4.2.2 Hmotnostní tok vypočtený programem ANSYS CFX.....	49
4.2.3 Tlak ve stroji	58
5 ZÁVĚR.....	62
LITERATURA	63
PŘÍLOHY	64



SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1-1 Princip činnosti synchronního stroje [1].....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 1-2 Tok výkonu synchronního stroje [1].....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 1-3 Synchronní stroj s vyniklými póly a vlastní ventilací [2]</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 1-4 Synchronní stroj s uzavřeným systémem ventilace [2].....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 2-1 Rychlostní profily laminárního (část a)) a turbulentního proudění (část b)) [4]</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 2-2 Rychlostní profily turbulentního proudění (část a)). Laminární oblast turbulentního proudění přesahující (část b)) a nepřesahující (část c)) vyvýšeniny stěny kanálu [4]</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 2-3 Schéma průtoku vzdušiny oběžným kolem jednotlivých druhů ventilátorů [5].....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 2-4 Universální prostředí Workbench s otevřeným projektem Ansys CFX a CFD Post</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 3-1 Skutečný (zadaný) ventilátor.....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 3-2 Model skutečného ventilátoru</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 3-3 Model ventilátoru a)bez zaoblených hran lopatek b)s upraveným tvarem lopatek</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 3-4 Model ventilátoru a)s náhradou trychtýřovitou částí za rovnou diskovou b)s úplně odstraněnou trychtýřovitou částí</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 3-5 Model skutečného ventilátoru v komponentě CFX-Pre včetně výpočetní sítě</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 3-6 Pomocná plocha u konce lopatek.....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 3-7 Pomocná plocha na výstupu ventilátoru</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 3-8 Graf závislosti hmotnostního toku (vypočteného v CFD-Post) na počtu lopatek.....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 3-9 Rozložení hmotnostního toku a rychlosti na ploše u konce lopatek ventilátoru se sedmi lopatkami</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 3-10 Rozložení hmotnostního toku a rychlosti na ploše u konce ventilátoru se sedmi lopatkami</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 3-11 Graf závislosti hmotnostního toku (vypočteného z rychlosti) na počtu lopatek.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 3-12 Rozložení totálního tlaku na pomocných plochách ventilátoru se sedmi lopatkami.....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 3-13 Graf závislosti průměrného totálního tlaku na počtu lopatek</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 3-14 Graf závislosti hmotnostního toku (vypočteného z rychlosti) na tvaru ventilátoru</i>	<i>37</i>
<i>Obr. 3-15 Graf závislosti hmotnostního toku (vypočteného Ansyssem) na tvaru ventilátoru.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 3-16 Porovnání rozložení hmotnostního toku na ploše u konce lopatek ventilátorů s odstraněnou (vlevo) a změněnou (vpravo) trychtýřovitou částí.....</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 3-17 Graf závislosti průměrného totálního tlaku na tvaru ventilátoru</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 3-18 Graf závislosti hmotnostního toku (vypočteného z rychlosti) na otáčkách ventilátorů. 40</i>	
<i>Obr. 3-19 Graf závislosti hmotnostního toku (vypočteného Ansyssem) na otáčkách ventilátorů pro plochu u konce lopatek.....</i>	<i>41</i>



<i>Obr. 3-20 Graf závislosti hmotnostního toku (vypočteného Ansyssem) na otáčkách ventilátorů pro plochu u konce ventilátoru</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 3-21 Graf závislosti hmotnostního toku (vypočteného Ansyssem) na otáčkách ventilátorů pro obě plochy dohromady</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 3-22 Graf závislost průměrného totálního tlaku na otáčkách ventilátorů pro plochu u konce lopatek</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 3-23 Graf závislosti průměrného totálního tlaku na otáčkách ventilátorů pro plochu u konce ventilátoru</i>	<i>43</i>
<i>Obr. 4-1 Výkres analyzovaného generátoru</i>	<i>45</i>
<i>Obr. 4-2 Model analyzovaného generátoru v programu Autodesk Inventor Professional 2012 ...</i>	<i>46</i>
<i>Obr. 4-3 Pomocné vyhodnocovací roviny v generátoru v komponentě CFD-post</i>	<i>47</i>
<i>Obr. 4-4 Graf závislosti hmotnostního toku (vypočteného z rychlosti) na otáčkách na ploše ve vzduchové mezeře</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 4-5 Graf závislosti hmotnostního toku (vypočteného z rychlosti) na otáčkách na ploše u volného konce hřídele</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 4-6 Graf závislosti hmotnostního toku (vypočteného z rychlosti) na otáčkách na ploše u ventilátoru</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 4-7 Graf závislosti hmotnostního toku (vypočteného Ansyssem) na otáčkách na ploše u ventilátoru</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 4-8 Rozložení hmotnostního toku přes otvory v krytu ventilátoru originálního (vlevo) a ventilátoru s nahrazenou trychtýřovitou částí (vpravo) pro otáčky 3000 min⁻¹</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 4-9 Rozložení hmotnostního toku přes otvory v krytu ventilátoru originálního (vlevo) a ventilátoru s nahrazenou trychtýřovitou částí (vpravo) pro otáčky 600 min⁻¹</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 4-10 Rozložení hmotnostního toku přes otvory v krytu ventilátoru bez zaoblených lopatek pro otáčky 600 min⁻¹</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 4-11 Graf závislosti hmotnostního toku (vypočteného Ansyssem) na otáčkách na ploše ve vzduchové mezeře</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 4-12 Rozložení hmotnostního toku na ploše ve vzduchové mezeře originálního ventilátoru (vlevo) a ventilátoru s nahrazenou trychtýřovitou částí (vpravo) pro otáčky 3000 min⁻¹</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 4-13 Rozložení hmotnostního toku na ploše ve vzduchové mezeře originálního ventilátoru (vlevo) a ventilátoru s nahrazenou trychtýřovitou částí (vpravo) pro otáčky 600 min⁻¹</i>	<i>54</i>
<i>Obr. 4-14 Rozložení hmotnostního toku na ploše ve vzduchové mezeře ventilátoru bez zaoblených lopatek pro otáčky 600 min⁻¹</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 4-15 Graf závislosti hmotnostního toku (vypočteného Ansyssem) na otáčkách na ploše u volného konce hřídele</i>	<i>56</i>
<i>Obr. 4-16 Rozložení hmotnostního toku v otvorech u volného konce hřídele zleva u stroje s ventilátorem originální, s nahrazenou trychtýřovitou částí a bez zaoblení lopatek pro 3000 min⁻¹</i>	<i>57</i>



<i>Obr. 4-17 Rozložení hmotnostního toku v otvorech u volného konce hřídele zleva u stroje s ventilátorem originální, s nahrazenou trychtýřovitou částí a bez zaoblení lopatek pro 600 min⁻¹</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 4-18 Graf závislostí průměrného totálního tlaku na otáčkách na ploše u ventilátoru.....</i>	<i>58</i>
<i>Obr. 4-19 Graf závislostí průměrného totálního tlaku na otáčkách na ploše ve vzduchové mezeře</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 4-20 Graf závislostí průměrného totálního tlaku na otáčkách na ploše u volného konce hřídele</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 4-21 Graf závislostí průměrného dynamického tlaku na otáčkách u stroje s originálním ventilátorem.....</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 4-22 Graf závislostí průměrného statického tlaku na otáčkách u stroje s originálním ventilátorem.....</i>	<i>61</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

$A [m^2]$	plocha, přes kterou prochází tepelný tok (str. 19 _{kap.2.1.1})
$A [m^2]$	velikost teplosměnných ploch (str. 19 _{kap.2.1.2} , 20)
$A [m^2]$	plocha, přes kterou prochází vzduch (str. 45)
$C [-]$	konstanta (str. 20)
$D [m]$	průměr potrubí (str. 21, 22, 23, 24)
$D_H [m]$	hydraulický průměr (str. 22)
$E [m]$	střední výška vyvýšeniny drsné stěny kanálu (str. 24)
$G [m \cdot s^{-2}]$	tíhové zrychlení (str. 21)
$\text{grad } \vartheta [K \cdot m^{-1}]$	teplotní gradient (str. 21)
$L [m]$	délka potrubí (str. 22, 23)
$P [W]$	teplo přecházející z chladící plochy do chladícího média (str. 21, 2)
$P_{\text{mech}} [W]$	mechanický výkon generátoru (str. 15)
$P_{\text{mv}} [W]$	výkon pohonu ventilátoru (str. 25)
$P_v [W]$	vzduchový výkon ventilátoru (str. 25)
$P_\delta [W]$	výkon procházející přes vzduchovou mezeru (str. 15)
$P_1 [W]$	výkon generátoru dodávaný do sítě (str. 15, 16)
$P_2 [W]$	výkon na hřídeli generátoru (str. 15, 16)
$P [W \cdot m^{-2}]$	tepelný výkon sálající z povrchu (str. 20)
$Q [m^3 \cdot s^{-1}]$	průtokové množství (str. 23)
$Q_v [m^3 \cdot s^{-1}]$	průtok vzduchu ventilátorem (str. 25)
$Q_m [kg \cdot s^{-1}]$	hmotnostní tok (str. 34)
$R [m]$	poloměr potrubí (str. 20, 21)
$Re [-]$	Reynoldsovo číslo (str. 21, 22, 23, 24)
$R_{\text{th}} [K \cdot W^{-1}]$	tepelný odpor pevné látky (str. 19, 20)
$R [m]$	vzdálenost od středu potrubí (str. 20, 21)
$S [m^2]$	průřez kanálu (str. 22)
$U [m]$	obvod průřezu kanálu (str. 22)
$u [m]$	rychlost jednotlivých vrstev proudící kapaliny (str. 20, 21)
$v [m]$	rychlost proudění média (str. 21, 22, 23)
$v [m]$	průměrná rychlost proudění vzduchu (str. 34)
$v_m [m]$	maximální rychlost kapaliny (str. 21)
$\alpha [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$	součinitel přestupu tepla (str. 19, 20)



α_s [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$]	součinitel přestupu tepla sáláním (str. 20)
γ [$\text{N}\cdot\text{m}^{-3}$]	měrná tíha (str. 21)
ΔP [W]	vektor odváděného tepelného toku (str. 19)
ΔP_d [W]	dodatečné ztráty stroje (str. 15, 16)
ΔP_{Fe} [W]	ztráty stroje v magnetickém obvodu (str. 15, 16)
ΔP_{mech} [W]	mechanické ztráty stroje (str. 15, 16)
ΔP_n [W]	ztráty stroje ve vinutí (str. 15, 16)
ΔP_{n1} [W]	ztráty stroje ve vinutí statoru (str. 15, 16)
ΔP_{n2} [W]	ztráty stroje ve vinutí rotoru (str. 15, 16)
ΔP_Σ [W]	celkové ztráty stroje (str. 16)
Δp [Pa]	tlakový spád – tlaková ztráta (str. 22, 23)
Δp_{cv} [Pa]	celkový tlak ventilátoru (str. 25)
$\Delta \vartheta$ [K]	rozdíl teplot mezi dvěma izotermami (str. 19 _{kap.2.1.1})
$\Delta \vartheta$ [K]	rozdíl teplot mezi teplosměnnou plochou a chladícím médiem (str. 19 _{kap.2.1.2} , str. 20 _{kap.2.1.2})
$\Delta \vartheta$ [K]	rozdíl teplot mezi vyzařujícím a ozařovaným povrchem (str. 20 _{kap.2.1.3})
δ [m]	vzdálenost mezi izotermami (str. 21)
δ [m]	tloušťka laminární mezní vrstvy (str. 24)
η [-]	účinnost stroje (str. 16)
η_{cv} [-]	celková účinnost ventilátoru (str. 25)
Θ [K]	termodynamická teplota povrchu tělesa (str. 20)
λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	součinitel tepelné vodivosti látky (str. 21)
λ [-]	činitel odporu - tření nebo drsnosti (str. 22, 23, 24)
μ [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]	viskozita nebo-li součinitel vnitřního tření kapaliny (str. 20, 21, 22)
ν [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]	kinematická viskozita (str. 21, 22, 23)
ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	hustota proudícího média (str. 21, 22, 23)
ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	hustota vzduchu (str. 34)
σ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$]	Stefan-Boltzmanova konstanta (str. 20)
τ [Pa]	tečné napětí (str. 20)
τ_0 [Pa]	tečné napětí u stěny kanálu (str. 22)



ÚVOD

Protože v každém elektrickém stroji dochází ke ztrátám a tím vzniká nežádoucí ohřívání stroje, je nutné stroj účinně chladit. Je tedy nutné správně navrhnout systém chlazení elektrického stroje. Součástí návrhu systému chlazení elektrického stroje je ventilační výpočet takového stroje. A právě ventilačním výpočtem se zabývá tahle práce.

První dvě kapitoly jsou zaměřeny spíše teoreticky, z nichž první pojednává o synchronním stroji. Je v ní stručně vysvětlen princip činnosti synchronního stroje, ukázáno, které ztráty se ve stroji vyskytují a jak je díky nim postupně snižován výkon (tok výkonu stroje). Popsány jsou zde také způsoby chlazení synchronních strojů.

Druhá kapitola pojednává nejprve o jednotlivých druzích přenosu tepla (sdílení tepla vedením, prouděním a sáláním) a poté popisuje druhy proudění z hlediska směru rychlosti (laminární a turbulentní proudění). Další podkapitola je věnována ventilátorům a jejich rozdělení (axiální, diagonální, radiální a diametrální) a poslední podkapitola je věnována programu na výpočet proudění (Ansys CFX) a metodě, kterou k výpočtu používá.

Následující dvě kapitoly jsou již věnovány praktické části práce. První z nich pouze ventilátorům, které slouží jako zdroj proudění ve stroji. Jsou zde popsány jednotlivé vytvořené modifikace ventilátorů a stručně uvedeno nastavení programu Ansys CFX. Následně je pak analyzován zadaný ventilátor pro různé počty lopatek z hlediska hmotnostního toku a tlaku. Poté byly analyzovány jednotlivé modifikace ventilátorů, z nichž byly tři vybrány k další analýze. Tou byla analýza jednotlivých modifikací pro různé otáčky.

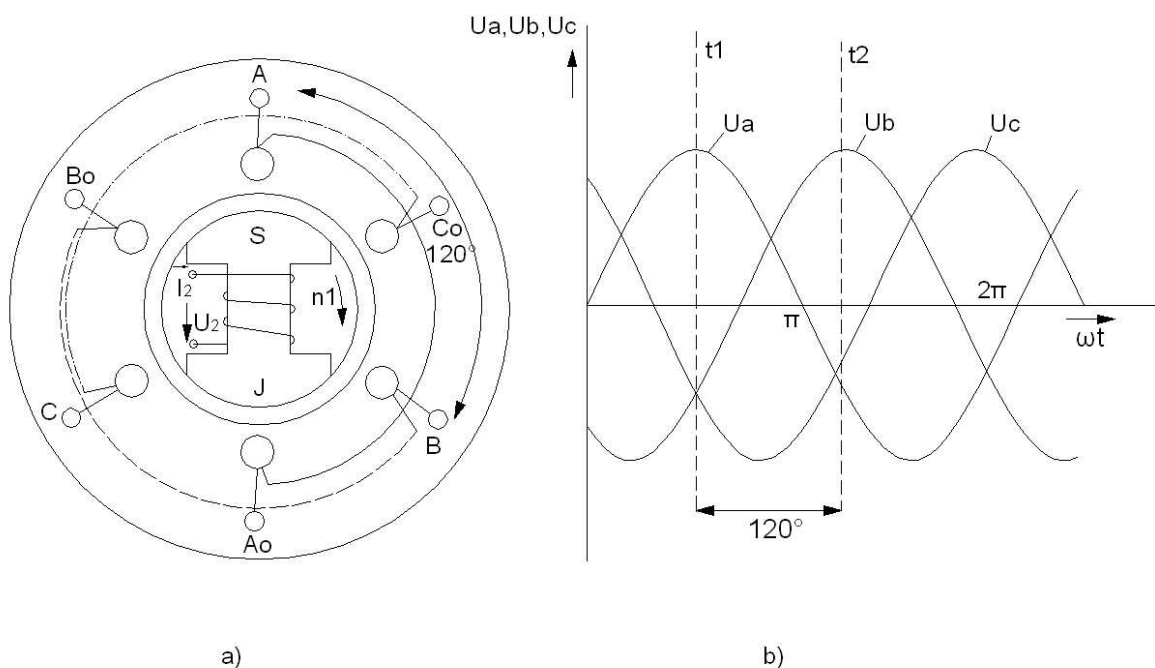
V poslední kapitole je již řešeno spojení zadaného synchronního generátoru se třemi vybranými modifikacemi ventilátoru. Je zde stručně popsán model stroje a opět použité nastavení programu Ansys včetně uvedení pomocných vyhodnocovacích rovin. Následně jsou vyhodnocovány jak hmotnostní toky vypočtené z rychlosti proudění, tak hmotnostní toky vypočtené Ansysem v závislosti na otáčkách pro stroj s jednotlivými modifikacemi ventilátorů. V těchto podkapitolách je ukázáno i rozložení hmotnostního toku přes jednotlivé roviny. Poslední podkapitola je pak věnována rozložení tlaku.

1 SYNCHRONNÍ STROJ

Synchronní stroje mají svůj název odvozeny od toho, že jejich rotor se otáčí stejnou rychlostí jako točivé magnetické pole, tzn. otáčí se synchronní rychlostí. Používají se převážně k výrobě elektrické energie, a to až do výkonů 1500 MVA. Jako zdroje elektrické energie se uplatňují také u automobilů, letadel, speciálních ženižních strojích a elektrocentrálách. Vyrábějí se jednofázové i třífázové. Synchronní motory jsou rozšířené méně především proto, že se samy nedokážou rozběhnout [1].

Synchronní stroj se skládá ze statoru, na kterém je obvykle uloženo trojfázové vinutí, a z rotoru, kde se obvykle nachází vinutí budicí. Z hlediska konstrukce se synchronní stroje dělí na dva základní typy. Prvním typem je stroj s vyniklými póly. Stroj má velký průměr a malou osovou délku. Druhým typem je stroj s hladkým rotorem. Tyto stroje mají menší průměr a větší osovou délku.

Klasický synchronní stroj má budicí vinutí na rotoru stejnosměrné a na statoru má trojfázové vinutí. Toto uspořádání je možné vidět na Obr. 1-1 a). Zde je trojfázové statorové vinutí znázorněno cívkami s jedním závitem označené A, B, C. Vinutí bývají navzájem posunuta o 120° a provedena jako dvoupólová.



Obr. 1-1 Princip činnosti synchronního stroje [1]

Pokud stejnosměrný proud prochází budícím vinutím rotoru, vytvoří se magnetické pole, jehož siločáry prochází ze severního pólu přes vzduchovou mezeru, magnetický obvod statoru a druhou vzduchovou mezeru do pólu jižního. Pokud se rotor otáčí, indukuje magnetické pole na statorovém vinutí harmonické napětí, které je znázorněno na Obr. 1-1 b). Pokud je rotor v poloze jako na Obr. 1-1 a), je maximální napětí v cívkách A. Ve zbylých dvou cívkách (B a C) bude napětí o maximální amplitudě, pokud bude rotor otočen o 120° respektive 240° .

1.1 Výkonové rozdělení

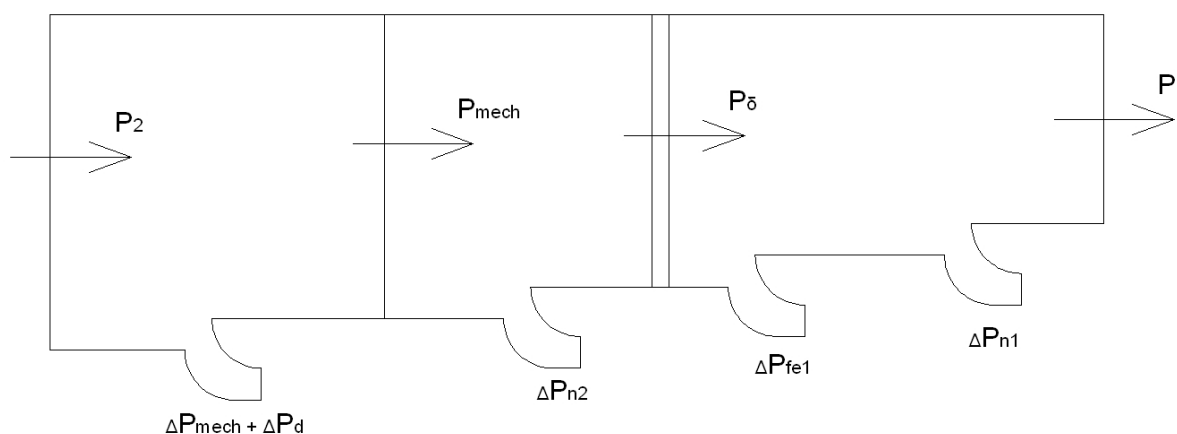
V elektrických strojích se vždy část energie, kterou do stroje přivedeme, promění na tepelnou energii. Tato přeměna je pro nás nežádoucí, protože pro nás představuje ztráty a vznik vývinu tepla ve stroji, které je potřeba ze stroje odvést. Od velikosti ztrát je také odvislá účinnost stroje [1]. Ztráty dělíme na:

- Ztráty mechanické ΔP_{mech} – Jsou to ztráty, které jsou způsobené třením v ložiscích stroje, třením rotujících částí o vzduch (ventilační ztráty), ale také třením kartáčů o kroužky nebo komutátor.
- Ztráty v magnetickém obvodu ΔP_{Fe} – Často také nazývané ztráty v železe. Tyto ztráty obsahují ztráty hysterezní a ztráty od vířivých proudů.
- Ztráty ve vinutí ΔP_n – Jsou ztráty způsobené průchodem proudu vodičem a jsou úměrné odporu vinutí a druhé mocnině protékajícího proudu.
- Ztráty dodatečné ΔP_d – Jsou ztráty dodatečné, způsobené především vyššími harmonickými, vířivými proudy ve hmotách blízkých vinutím a ztráty v komutátoru.

Celkové ztráty jsou pak dány součtem jednotlivých ztrát stroje a lze pomocí nich vypočítat účinnost stroje, pokud známe příkon nebo výkon stroje.

1.1.1 Tok výkonu synchronního stroje

Tok výkonu synchronního generátoru je znázorněn na Obr. 1-2, kde P_2 je výkon na hřídeli generátoru, P_{mech} je mechanický výkon, P_δ je výkon procházející přes vzduchovou mezeru z rotoru stroje do statoru a P_1 je výkon generátoru dodávaný do sítě. Pokud by se jednalo o synchronní motor, byl by tok výkonu přesně opačný, a sice od P_1 do P_2 .



Obr. 1-2 Tok výkonu synchronního stroje [1]

Na hřídel stroje je přiváděn výkon P_2 , který je následně snížen o různé mechanické ztráty ΔP_{mech} , jako např. tření v ložiscích. Pokud je stroj osazen ventilátorem pro chlazení, je nutné do mechanických ztrát připočítat ještě ztráty způsobené ventilátorem, který třením o vzduch stroj brzdí. Výkon P_2 je ještě snižován o ztráty dodatečné ΔP_d . Po odečtení již zmiňovaných ztrát je nutné od něj odečíst ztráty ve vinutí rotoru ΔP_{n2} [W]. Abychom z výkonu P_δ dostali výkon

dodávaný do zátěže P_1 , musíme od něj odečíst ztráty v železe ΔP_{Fe} a ztráty ve vinutí statoru ΔP_{n1} . Ztráty v železe ΔP_{Fe} [W] se skládají ze ztrát hysterezních a ztrát od vířivých proudů.

Celkové ztráty ΔP_{Σ} [W] stroje jsou pak dány součtem jednotlivých ztrát stroje

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{mech} + \Delta P_d + \Delta P_{n2} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{n1}. \quad (1.1)$$

Účinnost stroje η [-] pak můžeme vypočítat ze vztahu

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} = \frac{P_2 - \Delta P_{\Sigma}}{P_2} = \frac{P_1}{P_1 + \Delta P_{\Sigma}}. \quad (1.2)$$

1.2 Způsoby chlazení synchronních strojů

Jedním z nejdůležitějších problémů při konstrukci elektrického stroje je dostatečné odvedení tepla z částí stroje, které se vlivem ztrát ohřívají. Pokud by nedocházelo k dostatečnému chlazení těchto částí stroje, stroj by se začal přehřívat, což by vedlo ke snížení životnosti stroje, jeho poškození nebo dokonce ke zničení [2].

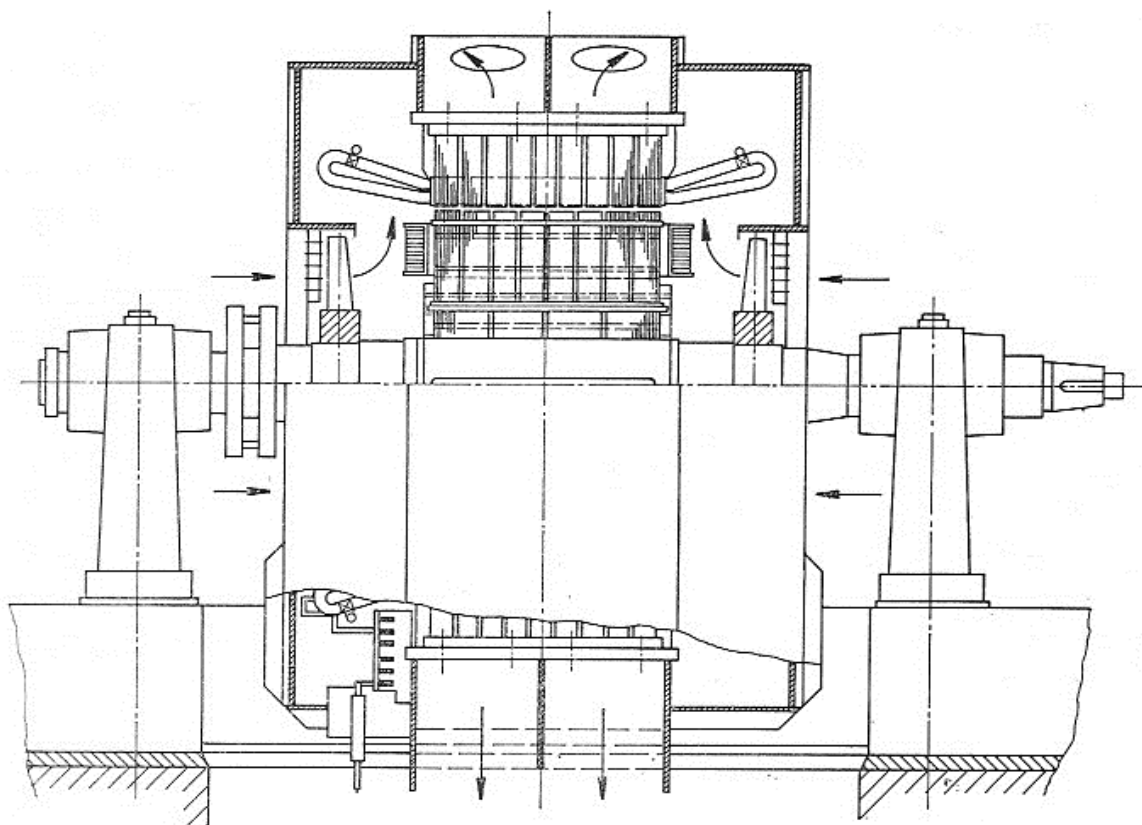
Při volbě ventilačního systému je nutné respektovat rozložení ztrát ve stroji. Je zejména nutné na části stroje, kde dochází k největším ztrátám, přivádět chladný vzduch (nebo jiné chladicí médium) a co nejrychleji jej pak odtud ohřátý odvést pryč. Synchronní stroje s otevřeným oběhem chladiva můžeme rozdělit na

- Stroje s přirozeným chlazením – Nemají zvláštní zařízení pro chlazení.
- Stroje s vlastní ventilací – Chlazení zajišťuje buď ventilátor nasazený přímo na hřídeli rotoru stroje, nebo speciální zařízení, které je poháněno rotorem.
- Stroje, u nichž je chladivo přiváděno zařízením umístěným mimo samotný stroj.

Do skupiny strojů, které nemají zvláštní zařízení pro chlazení a jsou tedy chlazeny pouze přirozeným chlazením, patří především stroje s vyniklými póly s malou osovou délkou. Tyto stroje mají díky vyniklým pólům značný ventilační účinek a není tedy potřeba žádného přídavného ventilátoru.

U strojů o větší osové délce se obvykle využívá nejjednoduššího typu ventilátoru, který je tvořen radiálními lopatkami ve tvaru křídel nebo se z obou stran rotoru mezi póly připevní jednoduché radiální lopatky skloněné ve směru otáčení (tzv. radiálně-axiální ventilátory).

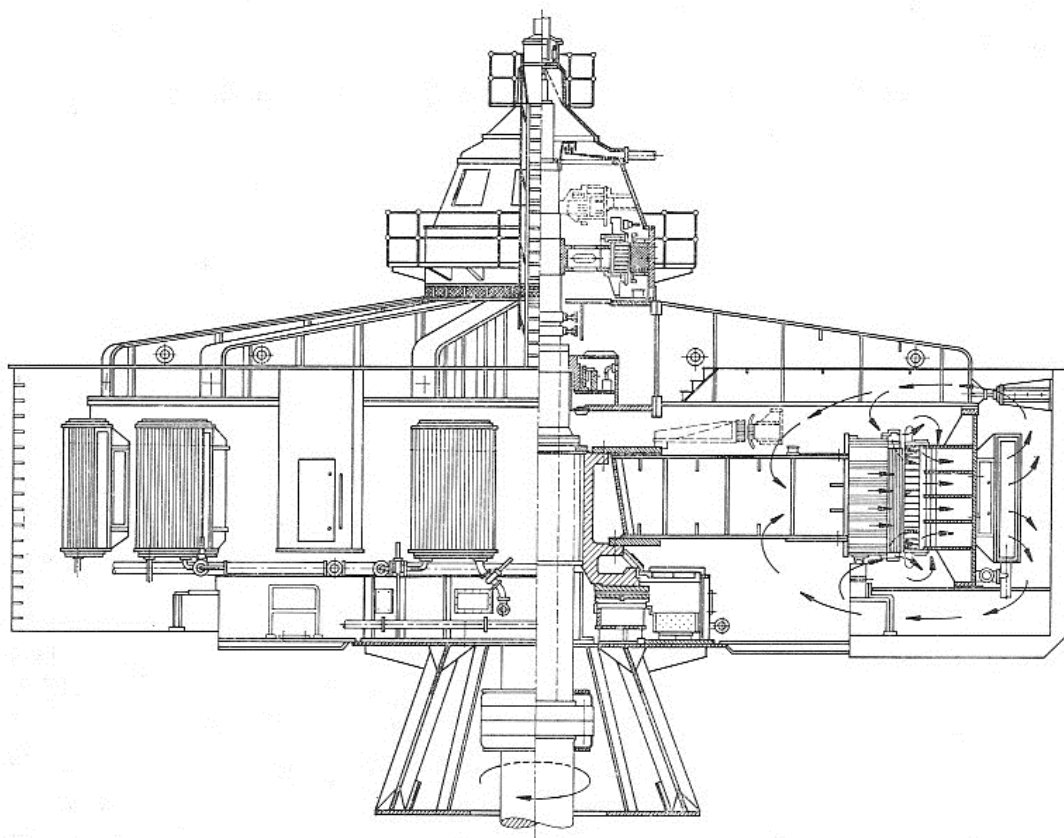
U synchronních strojů větších výkonů se většinou používají ventilátory axiální, protože vykazují menší ventilační ztráty než ventilátory radiální. Bývají nasazeny na hřídeli rotoru z obou stran a tím zaručují přívod dostatečného množství vzduchu do středu stroje. Takový stroj je vidět na Obr. 1-3.



Obr. 1-3 Synchronní stroj s vyniklými póly a vlastní ventilací [2]

Při výše uvedených způsobech chlazení ovšem může docházet k zanášení stroje prachovými částicemi. Tenhle problém je možné řešit filtry, což ovšem znamená tlakovou ztrátu, nebo v případě olejových filtrů možnost zanášení oleje do stroje. Další možností je použití uzavřeného oběhu chladiva. Tento systém se používá hlavně u strojů velkých výkonů. Vzduch (plyn) projde aktivní částí stroje (kde dojde k jeho ohřátí) z níž se dostane do chladiče, zchladí se a vrací se zpět do aktivní části. Chladiče jsou tvořeny soustavou trubek, přes které protéká voda. Chladič je ze strany vzduchu žebrovaný. Na Obr. 1-4 je uveden příklad takového systému. Šipky v něm označují směr proudění chladicího vzduchu.

U turboalternátorů a synchronních kompenzátorů, jejichž výkon je od 30 000 kVA výše, se v uzavřených systémech používá jako chladicí médium vodík. Je to z důvodu toho, že při atmosférickém tlaku a poměru 97 % vodík a 3 % vzduch je hustota chladicího média přibližně desetina hustoty vzduchu. To znamená, že se podstatně sníží ventilační a mechanické ztráty (přibližně 10 krát), a tím se zvýší účinnost stroje. Na druhou stranu je nutné neustále kontrolovat čistotu vodíku ve stroji, aby se nevytvořila výbušná směs. Protože vodík se vzduchem vytváří výbušnou směs při obsahu vodíku od 7 % do 70 %.



Obr. 1-4 Synchronní stroj s uzavřeným systémem ventilace [2]

2 SDÍLENÍ TEPLA A VENTILACE

2.1 Přenos tepla

Teplo vznikající díky ztrátám v elektrickém stroji se odvádí do okolí (sdílí se) nebo do chladicího média pomocí tří způsobů sdílení tepla [3]. Jedná se o sdílení pomocí:

- a) Vedením (kondukcí)
- b) Prouděním (konvekcí)
- c) Sáláním (radiací)

2.1.1 Sdílení tepla vedením

Sdílení tepla vedením v pevných látkách bez vnitřních zdrojů tepla se řídí Fourierovým zákonem

$$\Delta P = -\lambda \cdot A \cdot \text{grad} \vartheta, \quad (2.1)$$

kde ΔP [W] je vektor odváděného tepelného toku, λ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] je součinitel tepelné vodivosti látky, A [m^2] je plocha, kterou prochází tepelný tok a $\text{grad} \vartheta$ [$\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$] je teplotní gradient.

Pro technické veličiny je Fourierův zákon analogický s Ohmovým zákonem pro elektrické veličiny. To je patrné ze vztahu

$$\Delta \vartheta = R_{th} \cdot \Delta P = \frac{\delta}{\lambda \cdot A} \cdot \Delta P, \quad (2.2)$$

kde $\Delta \vartheta$ [K] je teplotní rozdíl mezi dvěma izotermami, R_{th} [$\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$] je tepelný odpor pevné látky a δ [m] je jejich vzdálenost.

Hnací silou sdílení tepla vedením mezi místem vstupu tepelného toku (výkonu) do tělesa a chladicí plochou je vždy teplotní rozdíl $\Delta \vartheta$.

2.1.2 Sdílení tepla prouděním

Do chladicího média proudícího kolem chladících (teplosměnných) ploch se teplo z těchto ploch odvádí pomocí konvekce. Proudění zahrnuje všechny procesy výměny tepla mezi tekutinou a pevným tělesem při jejich styku. Množství tepla P [W], které přejde z chladicí plochy do chladicího média, je dáno Newtonovým vzorcem

$$P = \alpha \cdot A \cdot \Delta \vartheta, \quad (2.3)$$

kde α [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$] je součinitel přestupu tepla charakterizující intenzitu sdílení tepla, A [m^2] je velikost teplosměnných ploch a $\Delta \vartheta$ [K] je rozdíl teplot mezi teplosměnnou plochou a teplotou chladicího média.

Pokud vzorec přepíšeme do analogie Ohmova zákona pomocí tepelného odporu, dostaneme zdánlivě jednoduchý Newtonův vzorec

$$\Delta \vartheta = \frac{1}{\alpha \cdot A} \cdot P = R_{th} \cdot P. \quad (2.4)$$

Celá složitost výpočtu sdílení tepla konvekcí je pak redukováno na správné určení součinitele přestupu tepla α , který se určuje experimentálně pro různé důležité případy proudění (např. vnější obtékání těles, obtékání svazků trubek napříč i podél, průtok trubicemi a kanály různých tvarů atd.). Výsledky experimentů se na základě teorie podobnosti zpracovávají do tvaru bezrozměrných kritériálních rovnic. Tím se zajistí maximální možné zobecnění.

2.1.3 Sdílení tepla sáláním

V důsledku relativně nízkých teplot v elektrických strojích má sdílení tepla sáláním u strojů druhořadý význam. Při sálání se část energie tělesa mění v energii záření. Toto záření má větší vlnovou délku než světelné paprsky a šíří se prostorem přímočaře aniž by jej ohřívali. Po dopadu na jiné těleso se zcela nebo částečně opět změní na teplo. Na velikosti přenosu tepla sáláním má vliv jakost povrchu, vzájemná poloha vyzařujícího a ozařovaného povrchu a jejich teplota, tvar a velikost. Intenzita záření ubývá s druhou mocninou vzdálenosti.

Úhrnná hustota zářivého toku dokonale černého tělesa p [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$], což je vlastně výkon vyzářené plochy tělesa v celém spektru vlnových délek, je určen Stefan-Boltzmannovým zákonem

$$p = \sigma \cdot \Theta^4, \quad (2.5)$$

kde Θ [K] je termodynamická teplota povrchu tělesa a σ [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$] je Stefan-Boltzmannova konstanta.

Tepelný výkon sálající z povrchu lze vyjádřit v jednoduchém tvaru

$$p = \alpha_s \cdot \Delta \vartheta, \quad (2.6)$$

kde $\Delta \vartheta = \Theta - \Theta_a$ [K] a α_s [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$] je součinitel přestupu tepla sáláním.

2.2 Proudění z hlediska směru a rychlosti

Pokud proudí kruhovým kanálem kapalina nebo plyn, vzniká uvnitř kanálu síla na plošnou jednotku. Tzv. tečné napětí τ je opačného směru než má rychlost proudící kapaliny u [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$], protože stěny kanálu brzdí pohyb tekutiny [4]. Jako jednotka tečného napětí byl dříve používán kilopond na metr čtvereční [$\text{kp} \cdot \text{m}^{-2}$], ale v dnešní době je spíše používána modernější jednotka Pascal [Pa], popř. bar [bar]. Převodní vztah mezi jednotlivými jednotkami je

$$1 \text{ Pa} = 10^{-5} \text{ bar} \cong 0,102 \text{ kp} \cdot \text{m}^{-2}. \quad (2.7)$$

Velikost tečného napětí je dána vztahem

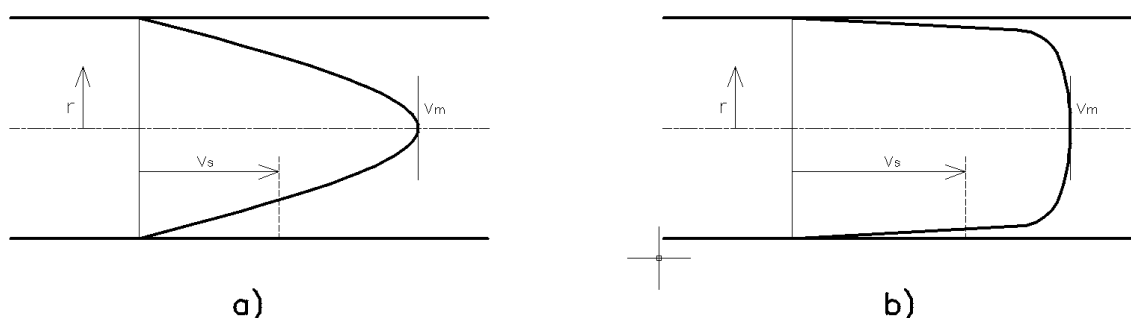
$$\tau = -\mu \frac{du}{dr} = C \frac{r}{R}, \quad (2.8)$$

kde r [m] je vzdálenost od středu potrubí (kanálu), u [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] je rychlost proudění jednotlivých vrstev proudící kapaliny, μ [Pa·s] je viskozita nebo-li součinitel vnitřního tření kapaliny (plynu), R [m] je poloměr potrubí, ve kterém kapalina proudí, a C je konstanta. Ze vztahu je zřejmé, že

tečné napětí roste lineárně se vzdáleností od středu k jeho stěnám, přičemž přesně uprostřed kanálu je nulové. Integrací vztahu (2.8) s mezemi $r=0$, $u=v_m$ a $r=R$, $u=0$ dostaneme vztah pro laminární proudění

$$u = v_m \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right], \quad (2.9)$$

kde v_m [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] je maximální rychlost kapaliny (plynu) v ose kanálu. Je tedy vidět, že rychlostní profil laminárního proudění je parabola druhého stupně a střední rychlost v kanálu je polovina maximální rychlosti v kanálu. Tuto situaci je možné vidět na Obr. 2-1a.



Obr. 2-1 Rychlostní profily laminárního (část a)) a turbulentního proudění (část b)) [4]

Při vyšších rychlostech se laminární proudění mění na proudění turbulentní, které je charakteristické tím, že rychlost u stěn rychle vzrůstá, zatímco u osy kanálu se rychlost vyrovnává. Rychlostní profil, který je znázorněn na Obr. 2-1b, má pak tvar paraboly vyššího stupně. Kompletní rozbor turbulentního proudění je značně složitý, a proto byl zaveden kvalitativní zákon. Podle tohoto zákona závisí výskyt turbulentního proudění (kromě samotné rychlosti) na průměru kruhového kanálu, viskozitě a na hustotě proudícího média. Pokusně bylo britským fyzikem Osbornem Reynoldsem nalezeno, že směrodatné pro charakter proudění je bezrozměrné číslo nazvané jako Reynoldsovo číslo

$$\text{Re} = \frac{v \cdot D \cdot \gamma}{\mu \cdot g}, \quad (2.10)$$

kde v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] je rychlost proudění média, D [m] je průměr potrubí (kanálu), γ [$\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$] je měrná tíha a g [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$] je tíhové zrychlení. Měrnou tíhu lze jednoduše vypočítat jako násobek hustoty média a tíhového zrychlení, čehož lze využít při definici kinematické viskozity ν [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$], jejíž hodnota v sobě skrývá dvě důležité vlastnosti pro určení charakteru proudění, a sice hustotu a viskozitu. Vypočteme ji ze vztahu

$$\nu = \frac{\mu \cdot g}{\gamma} = \frac{\mu}{\rho}, \quad (2.11)$$

kde ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] je hustota proudícího média. Po dosazení kinematické viskozity do (2.4) se vzorec pro výpočet Reynoldsova čísla zjednoduší na

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (2.12)$$

Jako přechod mezi laminárním a turbulentním prouděním se uvažuje hodnota $Re=2000$. Prakticky ovšem není tato hodnota daná přesně, ale pohybuje se v rozmezí Reynoldsova čísla přibližně mezi 1800 a 4000, přičemž může ve speciálních případech z této hranice i vybočovat.

Doposud byla prováděna analýza kanálu kruhového průřezu. Pokud by se ale mělo analyzovat proudění v kanále nekruhového průřezu, je nutné brát v úvahu nejen velikost průřezu S [m²], ale také obvod průřezu kanálu U [m], protože na něm vzniká díky tření tečné napětí. K porovnání dvou kanálů různých průřezů je možné použít poměr průřezu a jeho obvodu. Pokud vezmeme v potaz, že tento poměr je u kruhového průřezu $D/4$, tak pro libovolný průřez bude dobrou charakteristikou hodnota poměru $4S/U$. Tento poměr se nazývá hydraulickým průměrem průřezu a označuje se D_H .

Pro průřezy, kde se vyskytují hluboké zářezy, úzké štěrby apod., nelze poměr $D_H=4S/U$ použít, protože v úzkých částech může trvat laminární proudění, ale ve zbylé části průřezu již může být proudění turbulentní. V takových případech se při výpočtu D_H tato úzká místa vynechávají.

Pro výpočet tlakového spádu (tlakovou ztrátu) Δp [Pa] na potrubí neměnného kruhového průřezu, by se použil vztah

$$\Delta p = \lambda \frac{\rho}{2} v^2 \frac{L}{D}, \quad (2.13)$$

kde L [m] je délka potrubí a λ [-] činitel odporu (tření nebo drsnosti), který je funkcí Reynoldsova čísla. Pro nekruhové průřezy by situace byla obdobná, jen by se místo D dosadilo D_H . Závislost mezi tečným napětím a činitelem odporu je pak dána vztahem

$$\lambda = \frac{8\tau_0}{\rho \cdot v^2}. \quad (2.14)$$

kde τ_0 je tečné napětí u stěny kanálu.

2.2.1 Laminární proudění

Vyjde-li se ze vztahu (2.14) a vezme-li se v potaz rychlostní profil laminárního proudění v kanále kruhového průřezu, dostane se pro tečné napětí vztah

$$\tau_0 = \frac{8\mu \cdot v}{D}. \quad (2.15)$$

Po úpravách za pomoci vztahu (2.14) se dostane jednoduchý vztah závislosti mezi činitelem tření a Reynoldsovým číslem

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (2.16)$$

Pak tlaková ztráta v kruhovém kanálu je pro laminární

$$\Delta p = \frac{30 \cdot v \cdot \rho \cdot v \cdot L}{D^2}. \quad (2.17)$$

Je tedy zřejmé, že tlakový spád stoupá úměrně s rychlostí a tedy i s průtokovým množstvím Q [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]. A to je hlavním znakem laminárního proudění.

Pro nekulovité průřezy by se musel činitel tření určit početně, ne však za pomoci hydraulického průměru, ale individuálně pro každý druh průřezu zvlášť. Protože přestupy tepla jsou u laminárního proudění podstatně nižší než u turbulentního, tak je vhodné se mu při chlazení v elektrických strojích vyhýbat. Z tohoto důvodu se u elektrických strojů tolik nevyskytuje.

2.2.2 Turbulentní

U tohoto druhu proudění neklouzají jednotlivé vrstvy média ve směru proudění, ale tvoří makroskopické shluky tzv. turbulony, které neuspořádaně vybočují ze směru proudění, rozdělují se a rozpadávají se a znovu se vytvářejí v jiné. Mají tedy nestálou podobu a velikost. V proudícím médiu tedy existuje kromě hlavního pohybu ještě pohyb druhotný. Tento druhotný pohyb způsobuje velké zvýšení vnitřního tření v médiu, které tedy již u turbulentního proudění není dáno viskozitou, ale je přibližně 1000 krát až 10000 krát vyšší.

Dříve než bylo možné určit faktor tření pomocí výpočtu, určoval se pomocí měření, na jehož základě vznikly mnohé empirické vztahy v závislosti na Reynoldsově číslu. Pro hladké kanály jsou to následující vztahy:

$$\lambda = \frac{0,316}{\text{Re}^{0,25}} \quad (2.18)$$

pro $\text{Re} < 8 \cdot 10^4$,

$$\lambda = \frac{0,184}{\text{Re}^{0,2}}, \quad (2.19)$$

pro $5 \cdot 10^3 < \text{Re} < 2 \cdot 10^5$ a

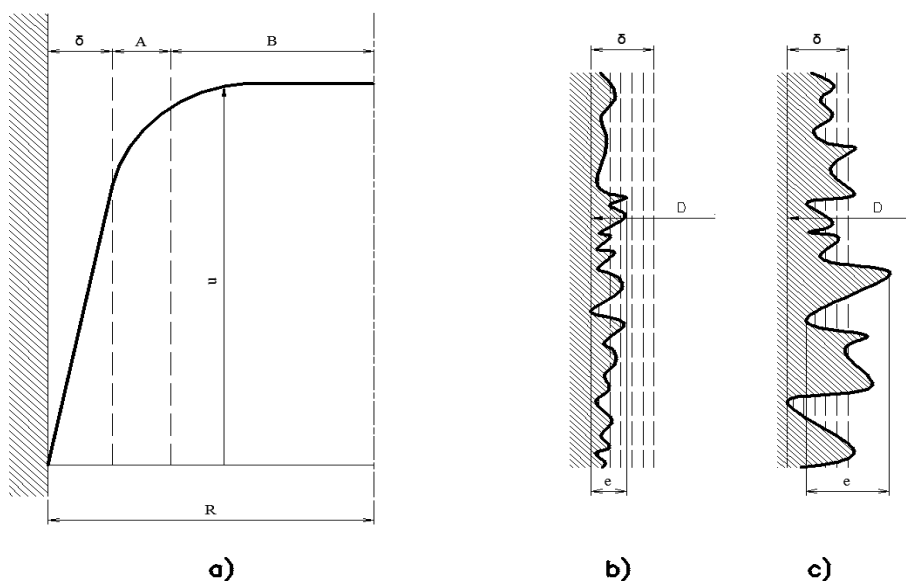
$$\lambda = 0,0054 + \frac{0,3964}{\text{Re}^{0,3}}, \quad (2.20)$$

pro $\text{Re} < 1,5 \cdot 10^6$.

Jak ukazuje Obr. 2-2, tak v bezprostřední blízkosti kanálu se turbulence neprojevuje a vzniká zde tzv. laminární mezní vrstva δ [m]. V této vrstvě stoupá rychlost proudění rovnoměrně se vzdáleností od stěny a má zde tedy viskozita původní význam jako u laminárního proudění. V těsné blízkosti této vrstvy se směrem ke středu potrubí nachází vrstva přechodná, kde se turbulence projevuje jen částečně (místně i časově). A za přechodnou vrstvou se už nachází samotné turbulentní jádro B, ve kterém zaniká účinek vazkých sil v proudícím médiu důsledkem prudkého nárůstu vnitřního tření způsobeného turbulencemi.

Pro turbulentní proudění lze z využitím vztahů (2.13) a (2.14) odvodit vztah pro činitel drsnosti

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \cdot \log \left(\frac{\text{Re} \cdot \sqrt{\lambda}}{2,51} \right). \quad (2.21)$$



Obr. 2-2 Rychlostní profily turbulentního proudění (část a)). Laminární oblast turbulentního proudění přesahující (část b)) a nepřesahující (část c)) vyvýšeniny stěny kanálu [4]

S tímto vztahem dobře souhlasí empirické vzorce (2.18) až (2.20) a používají se vždy pro určitý interval Reynoldsova čísla.

Pokud by se neurčovaly hladké kanály, ale kanály s určitou drsností, tak tlaková ztráta poroste (kvůli zvýšení činitele tření) při stálém Reynoldsově čísle se stupněm drsnosti. Pokud by ovšem drsnost byla konstantní a rostlo Reynoldsovo číslo, tak bude činitel tření klesat (zjištěno pokusně). Toto se ovšem bude dít jen do určité hodnoty Reynoldsova čísla a po překročení této hodnoty již bude činitel drsnosti konstantní. Tato hranice je dána vztahem

$$\text{Re} \sqrt{\lambda} \cdot \left(\frac{e}{D} \right) = 200, \quad (2.22)$$

kde e [m] je střední výška vyvýšenin drsné stěny kanálu. U nekruhových potrubí je průměr potrubí D nahrazen hydraulickým průměrem D_H . Pokud tedy dojde k překročení meze dle (2.22), pak bude mít činitel drsnosti konstantní hodnotu danou vztahem

$$\lambda = \frac{1}{\left[1,14 - 2 \cdot \log \left(\frac{e}{D} \right) \right]^2}. \quad (2.23)$$

Pokud by se tedy dosadil konstantní činitel tření do (2.22), získá se vztah pro výpočet této hranice jen za pomoci znalosti průměru kanálu a střední výškou vyvýšenin drsné stěny. Aby tedy byl činitel drsnosti konstantní, musí platit

$$\text{Re} > 400 \cdot \frac{D}{e} \cdot \log \frac{3,7 \cdot D}{e}. \quad (2.24)$$

2.3 Ventilátory

Jak již bylo napsáno v předchozích kapitolách, tak se ke chlazení elektrických strojů s oblibou používá ventilátorů, které jsou ve většině případů integrovány na hřídeli rotoru. Ventilátory jsou rotační lopátkové stroje, které jsou určeny ke kontinuální dopravě vzduchu (popř. jiné látky plynného skupenství) při malých kompresních poměrech [5]. Kompresní poměr je poměr absolutního tlaku na výtlaku k absolutnímu tlaku na sání stroje a u ventilátorů se pohybuje v rozmezích 1,01 až 1,1, někdy až k 1,3. U více stupňových ventilátorů se zcela výjimečně může blížit kompresní poměr až k 1,5, ale tyto se v elektrických strojích téměř nevyskytují.

V průtočné části ventilátoru předává oběžné kolo vzduchu mechanickou energii, jejímž zdrojem je pohon ventilátoru. Pokud je ventilátor nasazen na hřídeli rotoru, jak tomu většinou bývá, tak zdrojem této energie je samotný elektrický stroj, k jehož chlazení ventilátor používáme. Ventilátor je tedy pro stroj také zdrojem ztrát. Přírůstek energie jednotkového objemu vzduchu, vyjádřený zvýšením celkového tlaku vzduchu při průchodu ventilátorem se nazývá celkový tlak ventilátoru. Při průchodu vzduchu ventilátorem se díky jeho stlačitelnosti a změně tlaku vzduchu zvyšuje jeho hustota. Tuto změnu je v případech nízkého kompresního poměru (do 1,03) možné zanedbat a považovat změnu stavu vzduchu jako izochorickou. V případě vyššího kompresního poměru se změna stavu vzdušiny při průchodu ventilátorem uvažuje jako adiabatická.

Hodnota celkového tlaku ventilátoru Δp_{cv} [Pa] (charakterizovaného průměrem oběžného kola a jeho otáčkami) závisí na průtoku vzduchu ventilátorem Q_v [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]. Vzduch je charakterizován svou hustotou. Z celkového tlaku ventilátoru a průtoku vzduchu je možné vyjádřit vzduchový výkon ventilátoru P_v [W]

$$P_v = Q_v \cdot \Delta p_{cv} \quad (2.25)$$

Aerodynamickou jakost ventilátoru nám ukazuje celková účinnost ventilátoru η_{cv} [-] a počítá se jako poměr vzduchového výkonu ventilátoru a výkonu motoru (pohonu) P_{mv} [W].

2.3.1 Rozdělení ventilátorů

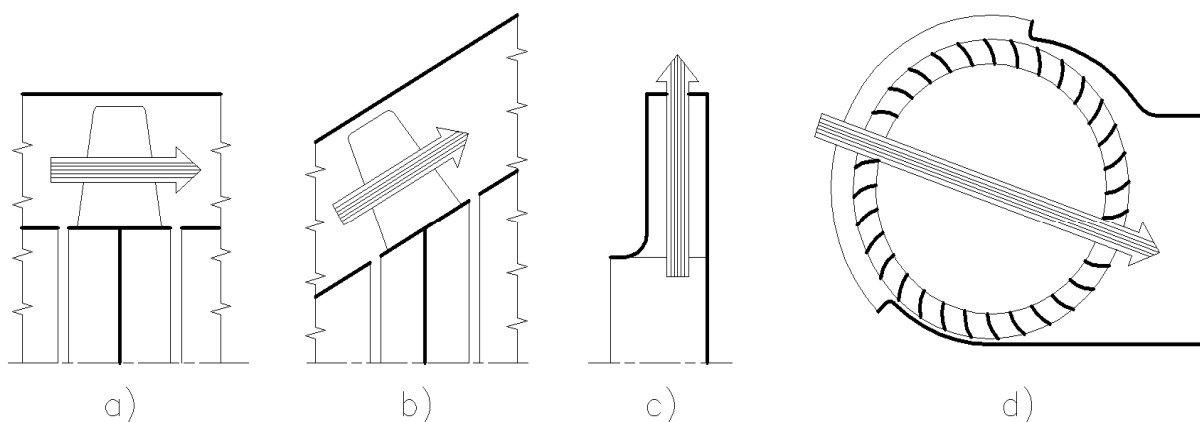
Určujícím kritériem pro rozdělení ventilátorů je směr proudění vzduchu oběžným kolem v jeho meridiánové rovině. Rozdělujeme tedy 4 základní druhy ventilátorů, a sice axiální, diagonální, radiální a diametrální. Jednotlivé typy ventilátorů jsou uvedeny na Obr. 2-3.

Axiální ventilátory (Obr. 2-3a) mají meridiánovou rychlost vzduchu na vstupu i výstupu oběžného kola přibližně rovnoběžnou s osou jeho rotace. Vzduch tedy prochází přibližně v axiálním směru.

Diagonální ventilátory (Obr. 2-3b) mají meridiánovou rychlost vzduchu na vstupu do oběžného kola přibližně rovnoběžnou s osou jeho rotace a meridiánovou rychlost na výstupu oběžného kola obecně skloněnou k ose jeho rotace. Vzduch prochází oběžným kolem v meridiánové rovině úhlopříčně vzhledem k axiálnímu a radiálnímu směru. Proudí tedy diagonálně.

Radiální ventilátory (Obr. 2-3c) mají meridiánovou rychlost na vstupu do oběžného kola přibližně rovnoběžnou s osou rotace a na výstupu z oběžného kola kolmou k ose rotace. Vzduch tedy prochází oběžným kolem přibližně v radiálním směru.

Diametrální ventilátory (Obr. 2-3d) mají meridiánovou rychlost vzduchu na vstupu i výstupu oběžného kola přibližně kolmou k jeho ose rotace. Vzduch tedy prochází oběžným kolem přibližně ve směru průměru, tedy diametrálně.



Obr. 2-3 Schéma průtoku vzdušiny oběžným kolem jednotlivých druhů ventilátorů [5]

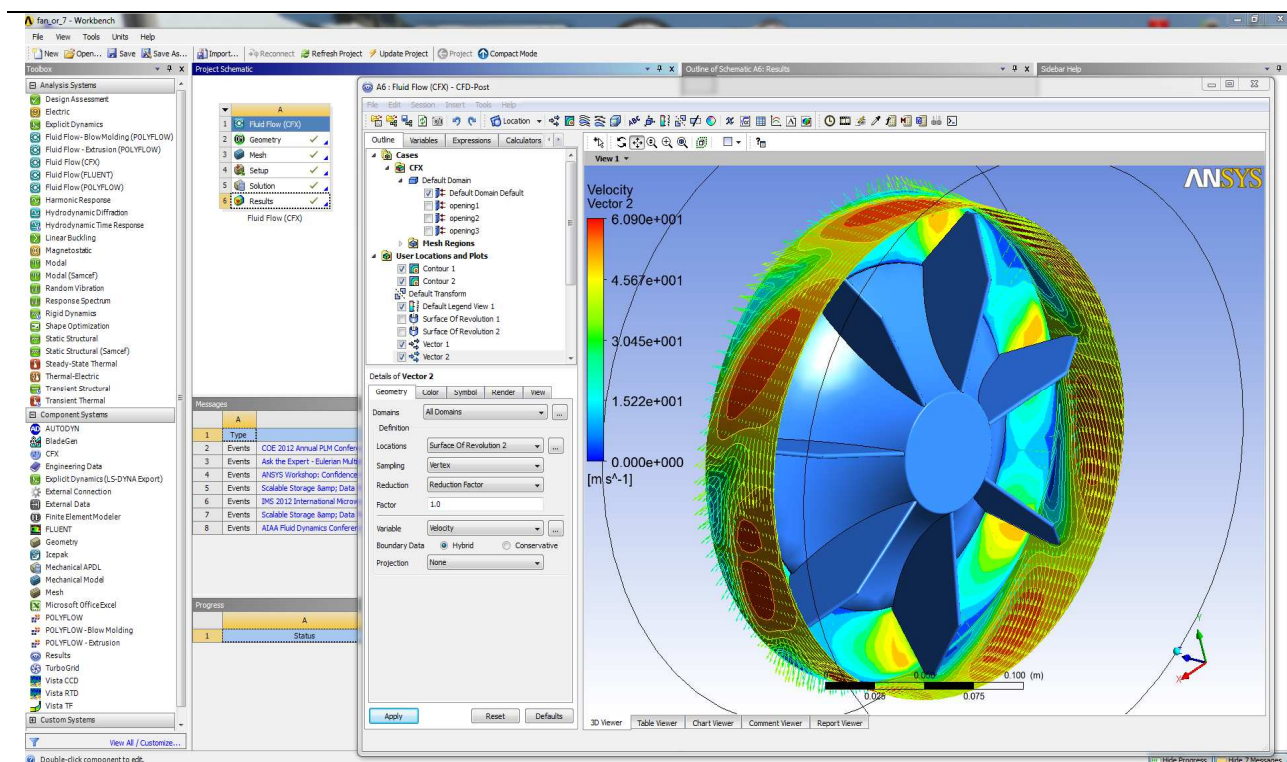
2.4 Ansys CFX – postup při výpočtu proudění

Program, který bude k výpočtu proudění využit, se nazývá Ansys CFX. Je to program, který je implementován do univerzálního prostředí Ansys Workbench [6]. Byl vyvinut ve Velké Británii v polovině 80. let a na přelomu tisíciletí se stal součástí nabídky firmy Ansys.

Ansys Workbench je univerzální rozhraní pro řadu programů, které se nacházejí v programové nabídce firmy Ansys. Program Ansys Workbench je možné využívat v různých operačních systémech a mezi jeho výhody patří podobné ovládání ve všech programech implementovaných v tomto prostředí. V tomto prostředí se také vytvoří geometrie (program Design Modeler) a výpočetní síť (program Meshing), která se pak dále využije při CFD výpočtech v programu Ansys CFX.

Samotný program Ansys se pak skládá ze tří komponent, které se spouští samostatně a pracují tedy nezávisle. První z trojice komponent přicházející na řadu po tvorbě geometrie a výpočetní sítě, je CFX-Pre, která slouží k definování úlohy z hlediska fyzikálních parametrů, jako jsou okrajové podmínky, turbulentní (laminární) model, materiál apod. Druhá komponenta je CFX-Solver. Jedná se pouze o řešič, který slouží pouze pro provedení výpočtu a zapsání výsledků do souboru. Není tedy třeba do něj nijak zasahovat. Poslední komponentou je CFX-Post. Tato komponenta slouží pro grafické vyhodnocení výsledku simulace, jako např. vyhodnocovací roviny, body, přímky, konturované obrázky, vektorové pole apod.

Řešení proudění v Ansys CFX probíhá tedy v pěti krocích, což je možné vidět i na Obr. 2-4. Zde je také vidět univerzální rozhraní Workbench verze 13.0 (včetně komponenty CFD-Post), což byla v ranní fázi projektu nejnovější verze programu Workbench.



Obr. 2-4 Universální prostředí Workbench s otevřeným projektem Ansys CFX a CFD Post

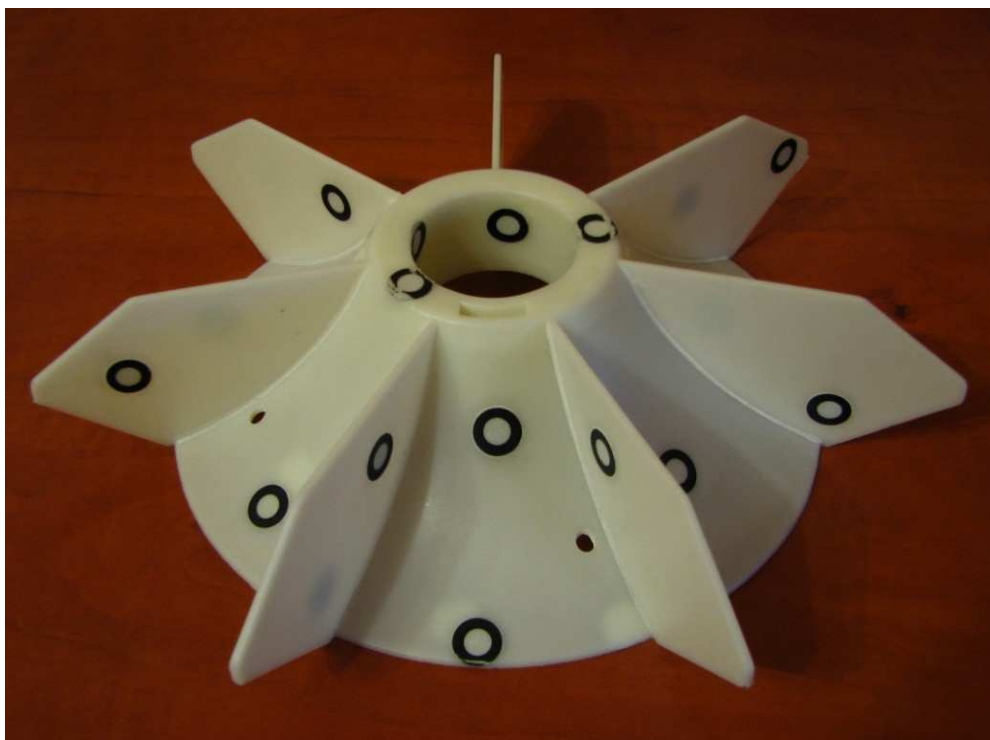
2.4.1 Metoda konečných objemů

Výše zmiňovaný program Ansys CFX používá k výpočtům proudění tzv. metodu konečných objemů. Tato metoda slouží k převedení parciální diferenciální rovnice na soustavu algebraických rovnic pro konečný počet prvků [7]. Princip metody spočívá v rozdělení početní oblasti na konečný počet objemů (tzv. kontrolních). Pro tyto objemy se použije integrální tvar rovnic a vhodným způsobem aproximují jednotlivé členy. Pole proměnných se nahrazuje průměrnými hodnotami pro dané kontrolní objemy. To je také hlavní rozdíl od metody konečných diferencí, ve které se používají hodnoty proměnných v bodech sítě.

3 VÝPOČTY PROUDĚNÍ VENTILÁTORU

Před započítáním analýzy samotného synchronního stroje je potřeba provést analýzu zdroje proudění ve stroji, tedy analýzu ventilátoru. Ačkoliv je ventilátor (jako u většiny elektrických strojů) nasazen na společné hřídeli, bude analyzován nejdříve samostatně a až poté připojen k synchronnímu stroji. Výpočet samotného ventilátoru totiž trvá podstatně méně než výpočet celé sestavy (ventilátor a stroj), což umožňuje provést více výpočtů u ventilátoru.

Při analýze proudění ventilátoru se vyšlo ze zadaného skutečného ventilátoru, který je možné vidět na Obr. 3-1. Jedná se o radiální ventilátor vyrobený z blíže neurčeného plastového materiálu. Ventilátor má průměr 230,7 mm a výšku 50,8 mm. Tělo ventilátoru je tvarově podobné trychtýři s rádiusem 93 mm, které je osazeno rovnoměrně rozloženými 7 lopatkami. Tyto lopatky jsou na svých koncích ve tvaru střechy o sklonu 53° ukončené rovnou plochou o délce 6 mm. Délka lopatek je na delší straně 86,5 mm. Hrany lopatek jsou z přední a horní části zaobleny. Přední stranou je myšlen axiální směr, kterým vzduch vstupuje do ventilátoru.



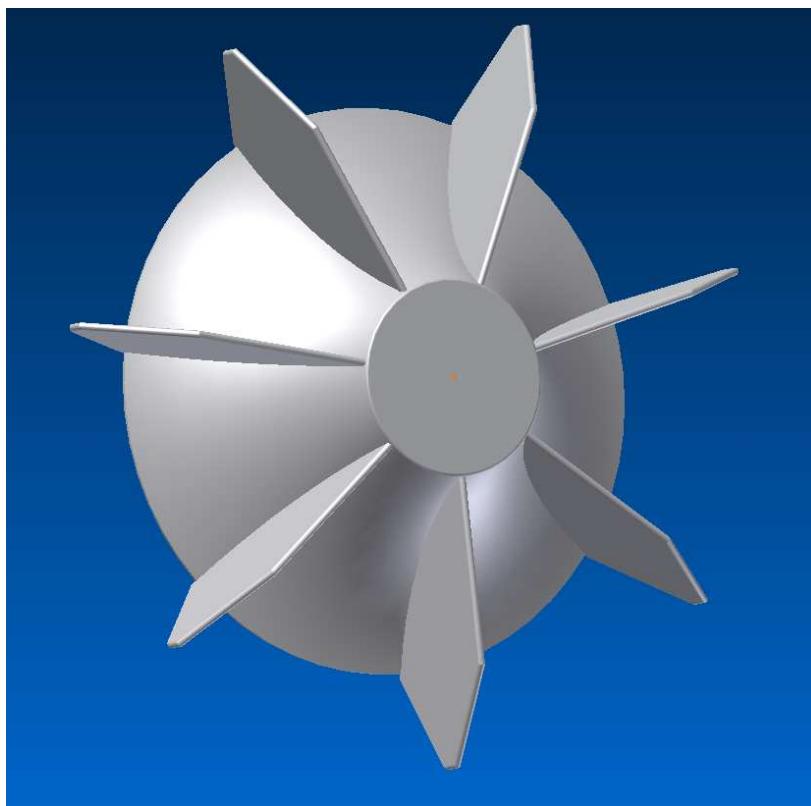
Obr. 3-1 Skutečný (zadaný) ventilátor

3.1 Model ventilátoru a jeho modifikace

Model ventilátoru byl pro účely analýzy vytvořen v programu Autodesk Inventor Professional 2012 a je možné jej vidět na Obr. 3-2. Zcela úmyslně je vymodelován bez otvoru pro hřídel, protože výpočet byl prováděn pro ventilátor samostatně a otvor pro hřídel by výpočet ovlivňoval. Naproti tomu čtyři malé otvory ve ventilátoru byly zanedbány a nebyly tudíž vymodelovány.

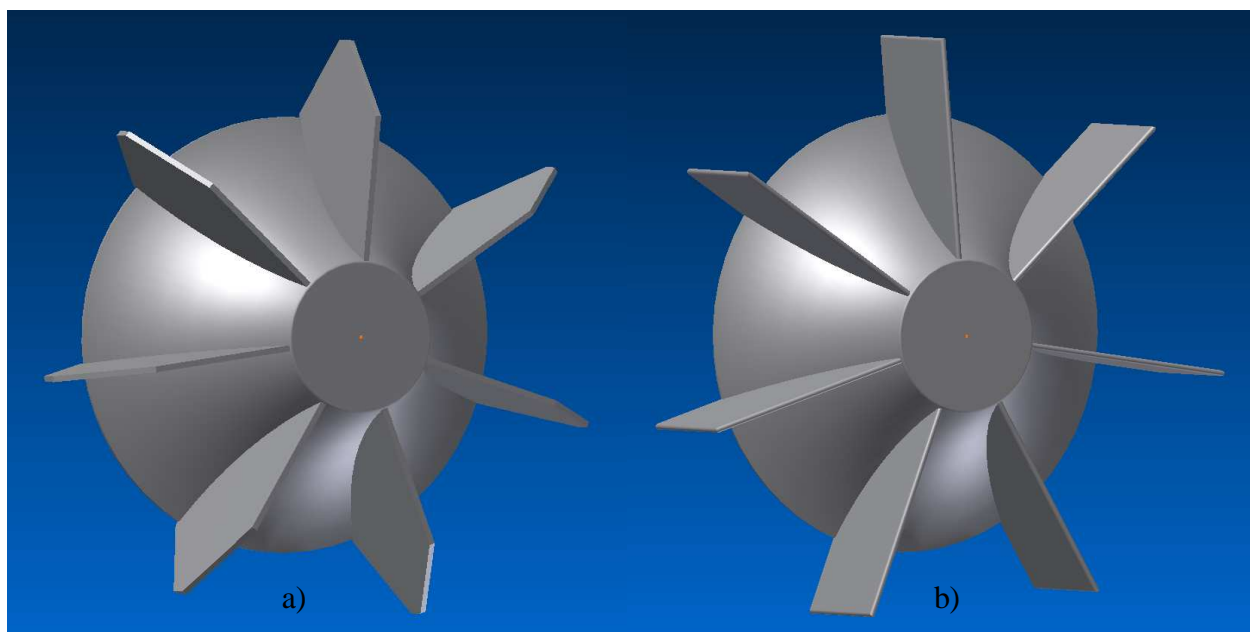
Tento základní model ventilátoru byl pak různě modifikován. Modifikace ventilátoru spočívali jednak v různých počtech lopatek a jejich tvaru, tak také v různých úpravách základního tvaru ventilátoru. Všechny tyto modifikace byly prováděny tak, aby se nezměnila výška a průměr ventilátoru a délka lopatek. Samozřejmě se neměnilo ani natočení nebo zahnutí lopatek,

protože je neměl ani původní ventilátor a dá se tedy předpokládat, že stroj, u kterého má ventilátor sloužit jako zdroj proudění, se může otáčet oběma směry. Ventilátor pak musí mít stejné vlastnosti při otáčení oběma směry a nesmí mít tedy natočené ani zahnuté lopatky.



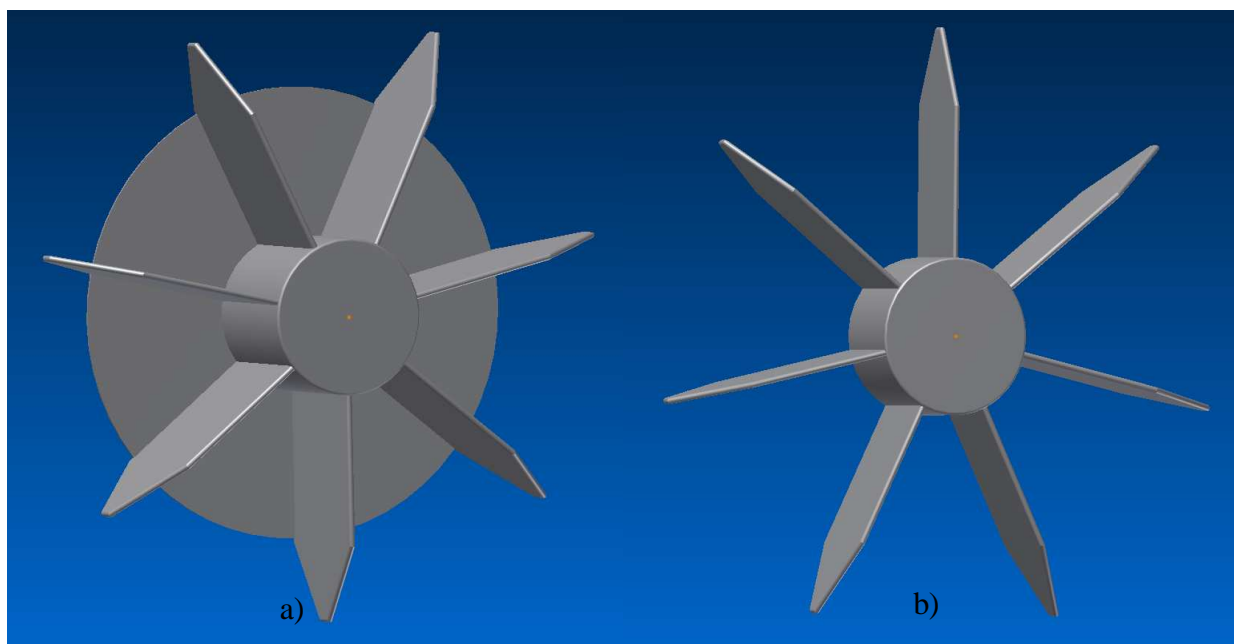
Obr. 3-2 Model skutečného ventilátoru

První modifikace vznikla pouhým odstraněním zaoblených hran lopatek a je možné ji vidět na Obr. 3-3 a). Druhá modifikace již změnila tvar lopatek více a to tak, že vznikly jednodušší lopatky, které mají větší plochu než lopatky originální ventilátoru. Tato modifikace je vidět na Obr. 3-3 b).



Obr. 3-3 Model ventilátoru a) bez zaoblených hran lopatek b) s upraveným tvarem lopatek

Další modifikace je možné vidět na Obr. 3-4. V obou případech byla odstraněna trychtýřovitá část ventilátoru. V první z nich (Obr. 3-4 a)) byla trychtýřovitá část nahrazena rovnou diskovou částí a v druhém případě (Obr. 3-4 b)) byla odstraněna úplně.



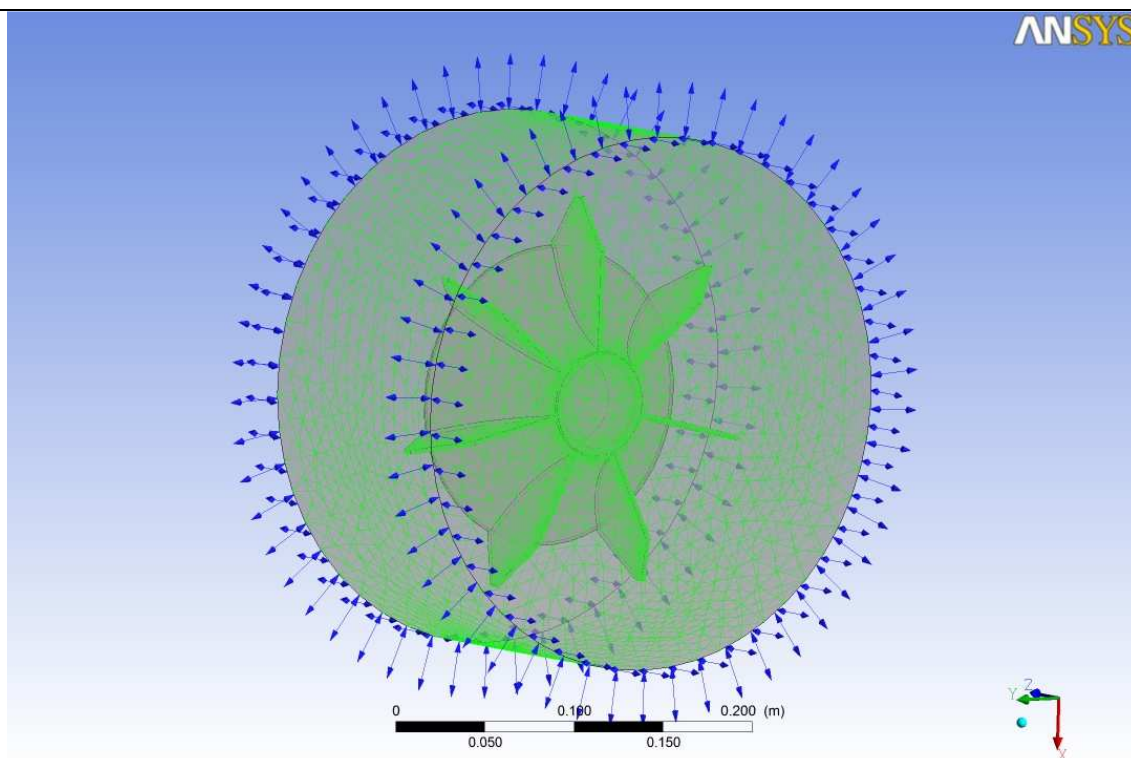
Obr. 3-4 Model ventilátoru a) s náhradou trychtýřovitou části za rovnou diskovou b) s úplně odstraněnou trychtýřovitou částí

Jak je vidět z Obr. 3-4 b), tak se poslední modifikací stal z radiálního ventilátoru axiální. To se ovšem dá kompenzovat umístěním do vhodného pouzdra, které bude ze zadní části plně uzavřeno a otvory bude mít pouze z radiální strany.

3.2 Nastavení a výpočet proudění ventilátoru v Ansys CFX

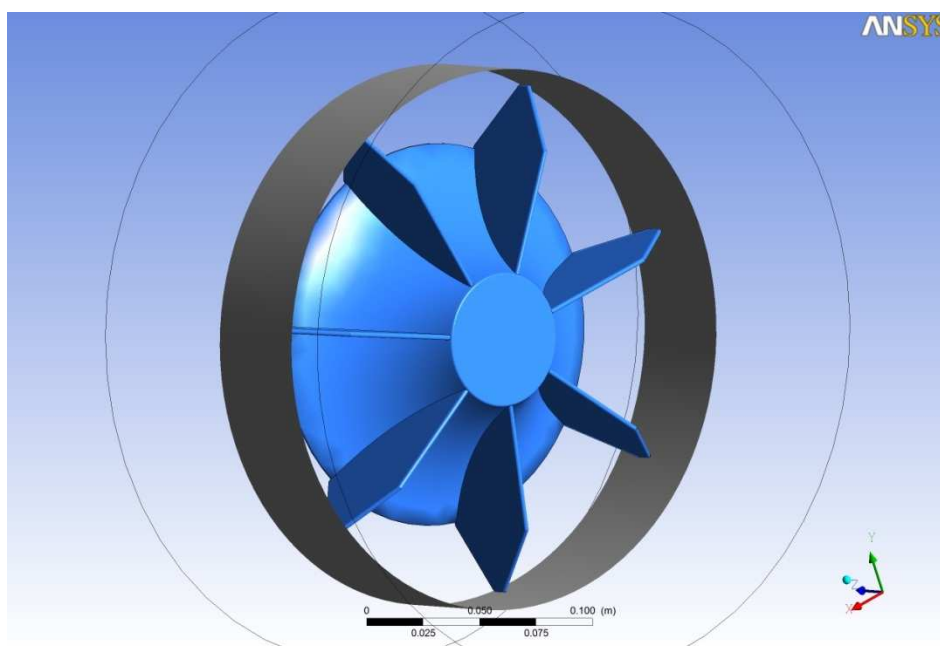
Samotný výpočet proudění v programu Ansys CFX probíhá automaticky v komponentě CFX-Solver a není možné do něj zasahovat. Lze jej ovlivnit pouze nastaveními před samotným začátkem výpočtu v komponentě CFX-Solver. Samotné nastavení výpočtu začalo importem geometrie, které se děje v Design modeleru a pomocí funkce Enclosure se pak model ventilátoru uzavřel do pomyslného vzduchového válce. V programu meshing pak bylo za pomoci funkce suppress potlačeno tělo ventilátoru, čímž se výpočet úlohy podstatně zrychlil a automaticky byla vytvořena výpočetní síť.

Další nastavení pak proběhla v komponentě CFX-Pre. Jako proudící médium byl zvolen vzduch o konstantní teplotě 25°C s referenčním tlakem 1 atm = 101325 Pa. Geometrie byla nastavena jako rotující v požadovaných otáčkách za minutu. Dále musely být nastaveny jednotlivé plochy válcové části uzavírající ventilátor do pomyslného vzduchového válce. Všechny byly nastaveny jako openning, což umožňovalo proudění vzduchu přes plochu oběma směry (směrem k ventilátoru i od ventilátoru). Všechny plochy byly určeny samozřejmě jako stacionární s relativním tlakem 0 Pa. Originální ventilátor včetně pomyslného válcového uzavření a výpočetní síť jak na ventilátoru, tak na uzavření, je zobrazen na Obr. 3-5.



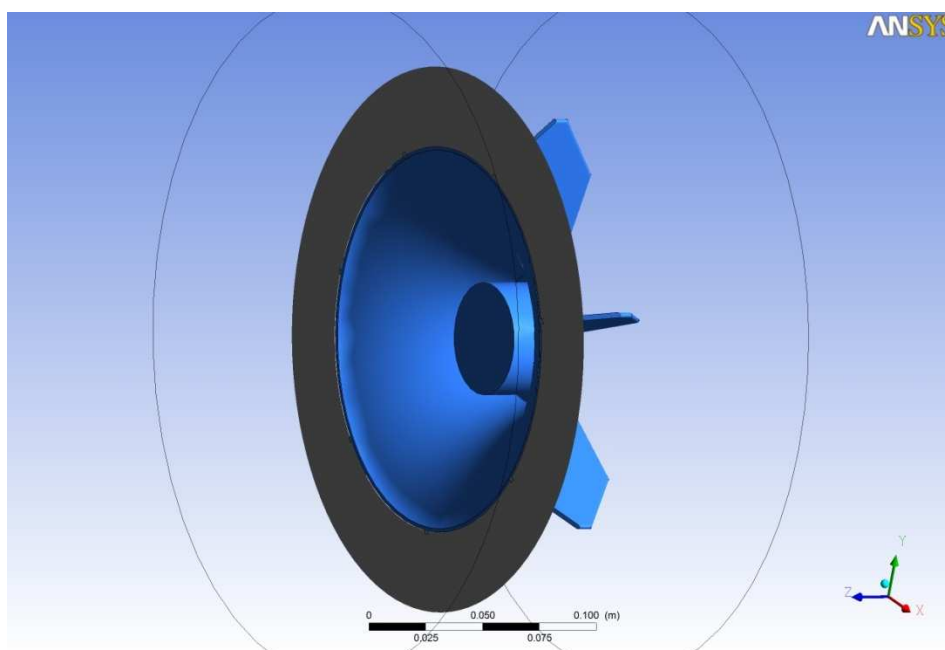
Obr. 3-5 Model skutečného ventilátoru v komponentě CFX-Pre včetně výpočetní sítě

Aby bylo možné proudění lépe vyhodnotit, byly v komponentě CFD-Post vytvořeny dvě pomocné roviny v těsné blízkosti ventilátoru. Pomocí těchto rovin pak bylo možné pomocí různých zobrazovacích nebo výpočetních funkcí proudění analyzovat. Obě dvě roviny byly vytvořeny pomocí funkce Surface of Revolution. První z rovin (šedá rovina na Obr. 3-6) byla vytvořena v těsné blízkosti kolem lopatek ventilátoru s šířkou rovnou výšce ventilátoru, tak aby na ní bylo možné analyzovat proudění v radiálním směru.



Obr. 3-6 Pomocná plocha u konce lopatek

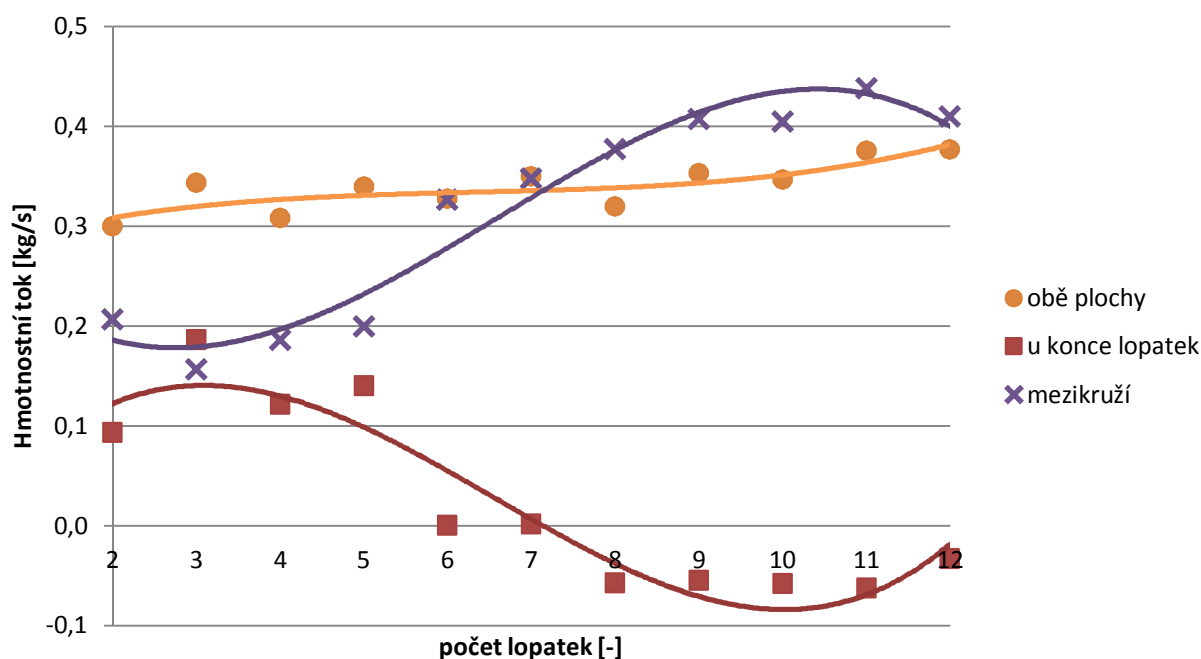
Druhá rovina byla vytvořena jako mezikruží na výstupu ventilátoru, tak aby vhodně doplnila první rovinu a zobrazovala proudění, které z ventilátoru bude vycházet diagonálně popř. axiálně. Tato rovina je zobrazena šedě na Obr. 3-7.



Obr. 3-7 Pomocná plocha na výstupu ventilátoru

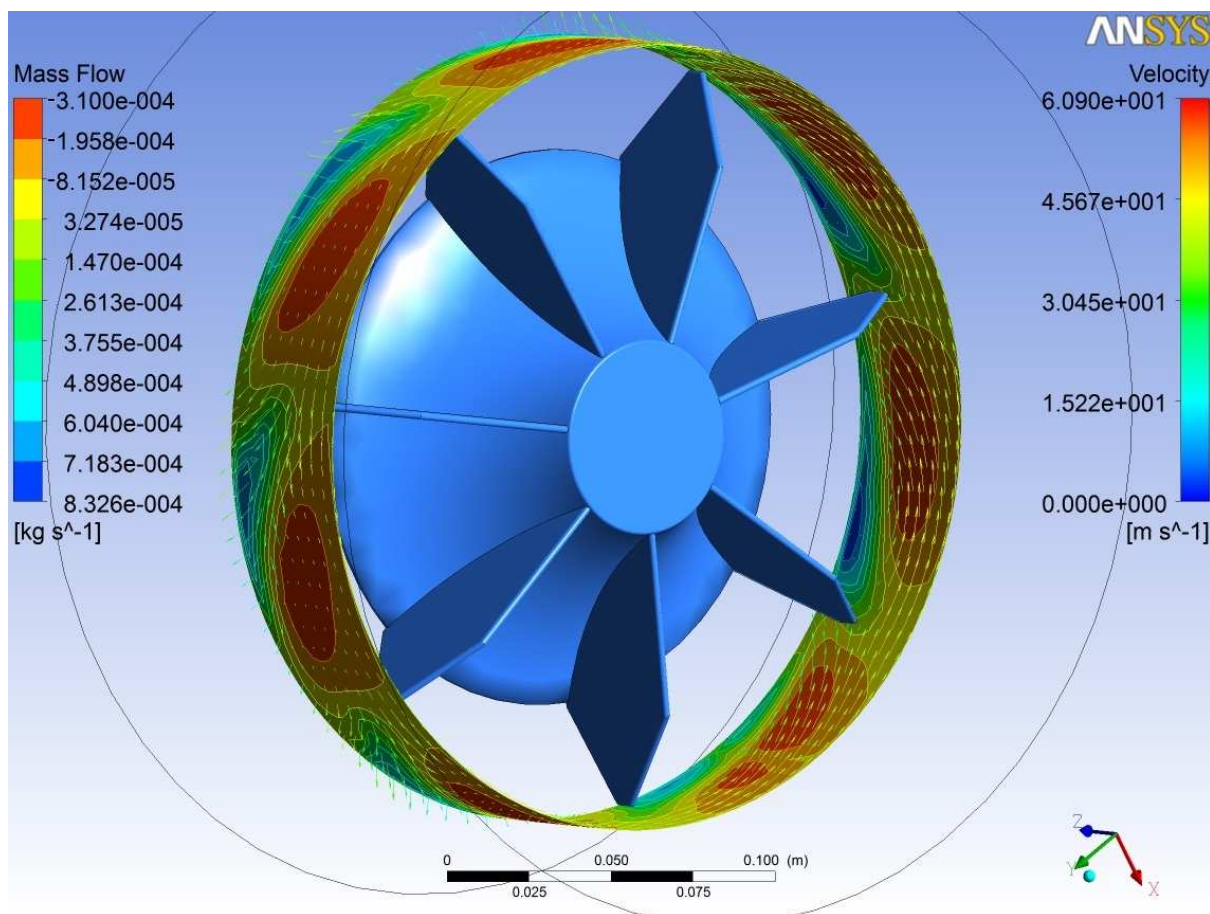
3.3 Proudění ventilátoru pro různé počty lopatek

Jak již bylo napsáno v kapitole 3.1, byl zadaný ventilátor několikrát modifikován a jedny z těchto modifikací byli různé počty lopatek ventilátoru. Při výpočtech těchto modifikací byly otáčky nastaveny na 3000 min^{-1} . Pro posouzení proudění pro různé počty lopatek pak byly především využity dvě pomocné roviny popsané v kapitole 3.2.



Obr. 3-8 Graf závislosti hmotnostního toku (vypočteného v CFD-Post) na počtu lopatek

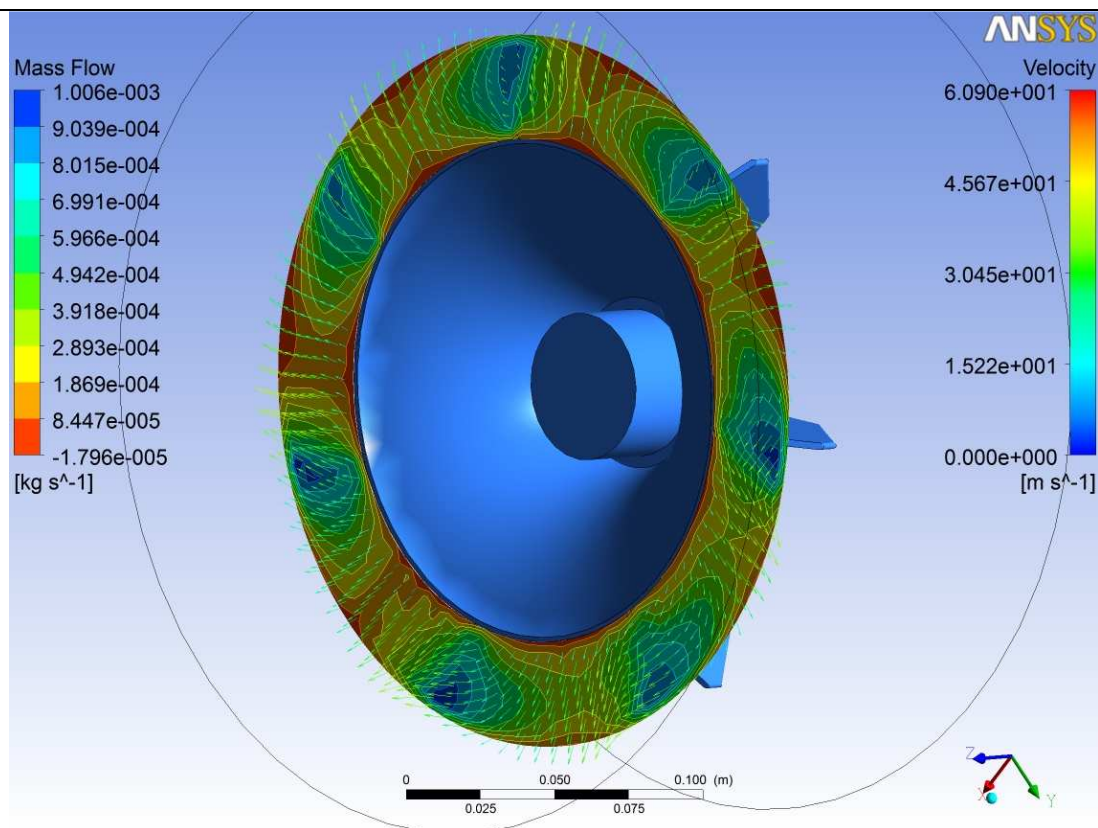
Veličina, která vypovídá o kvantitě proudění, je hmotnostní tok. Hmotnostní tok byl vyjádřen na každé z rovin pomocí aplikace Function calculator v programu CFD-Post a její závislost na počtu lopatek je možné vidět na Obr. 3-8. Dalo by se očekávat, že hodnota hmotnostního toku s počtem lopatek poroste s tím, že od určitého počtu lopatek bude již její nárůst jen velmi pozvolný a limitně se blížíci k určité hodnotě. Tomu ovšem zobrazené grafy zcela neodpovídají. Křivka vztahující se k mezikruží u konce ventilátoru by tomu předpokladu relativně ještě odpovídala a částečně i křivka pro obě plochy, ale křivka k ploše u konce lopatek ventilátoru ne. Především její pokles až do záporných hodnot vypadá nevěrohodně.



Obr. 3-9 Rozložení hmotnostního toku a rychlosti na ploše u konce lopatek ventilátoru se sedmi lopatkami

Tyto výsledky jsou způsobené tím, že výpočet je ovlivněn zápornými hodnotami hmotnostního toku. Jak je totiž možné vidět na Obr. 3-9, tak hmotnostní tok dosahuje na rovině kladných i záporných hodnot. To znamená, že je vzduch přes tuto plochu jak vytlačován pryč z ventilátoru, tak je do ventilátoru i nasáván. Jako kladné hodnoty jsou brány ty hodnoty, kdy je vzduch vytlačován z ventilátoru a záporné ty, kdy je vzduch sán dovnitř ventilátoru. Tuto skutečnost potvrzuje právě zobrazení vektorů. Na tomto obrázku jsou hodnoty hmotnostního toku barevně odlišeny přímo na ploše (legenda Mass flow) a rychlost proudění je zde zobrazena pomocí vektorů (legenda Velocity).

Tento jev se zápornými hodnotami hmotnostního toku se vyskytuje i na mezikruží za ventilátorem (Obr. 3-10), ale je zde již zastoupen v mnohem menší míře, což je patrné i z grafu na Obr. 3-8. V tomto případě opět kladná hodnota reprezentuje hmotnostní tok vzduchu odcházejícího z ventilátoru a záporná hodnota vzduch nasávaný dovnitř ventilátoru.



Obr. 3-10 Rozložení hmotnostního toku a rychlosti na ploše u konce ventilátoru se sedmi lopatkami

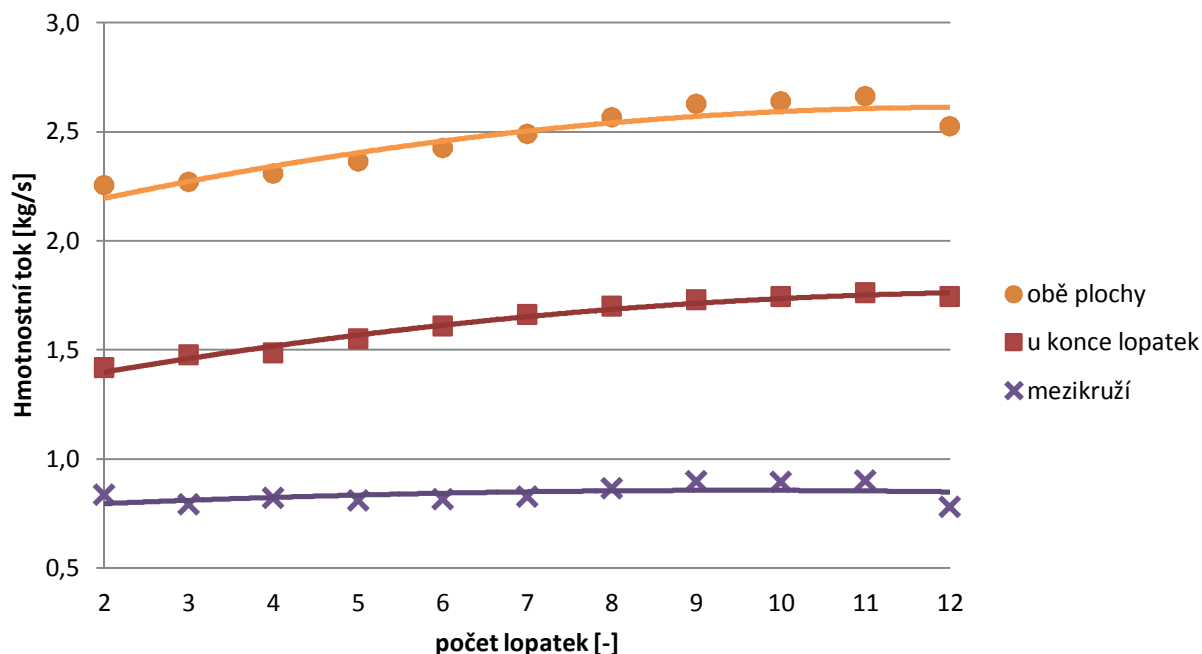
Výše popsané nasávání ventilátoru trochu komplikuje vyhodnocení výsledků, protože znemožňuje pro vyhodnocení použít hodnotu hmotnostního toku počítanou přímo Ansysem. Ovšem hodnotu hmotnostního toku je možné jednoduše vypočítat z průměrné rychlosti proudění při znalosti velikosti plochy, přes kterou vzduch prochází, a hustoty vzduchu. Ansys totiž při výpočtu průměrné rychlosti uvažuje jen velikost, nikoliv směr rychlosti, a tím pádem nám výpočet neovlivňují záporné hodnoty. Na druhou stranu je pak takový výpočet ze stejného důvodu značně zavádějící. Pokud bychom totiž potřebovali konkrétní hodnoty hmotnostního toku, nemohli bychom hodnoty vypočtené z rychlosti použít. Ovšem jako poměrné hodnoty (jako v tomto případě pro porovnání hmotnostního toku v závislosti na počtu lopatek) jsou takové výsledky dostačující. V takovém případě vypočteme hmotnostní tok Q_m [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$] ze vztahu

$$Q_m = \rho \cdot v \cdot A, \quad (3.1)$$

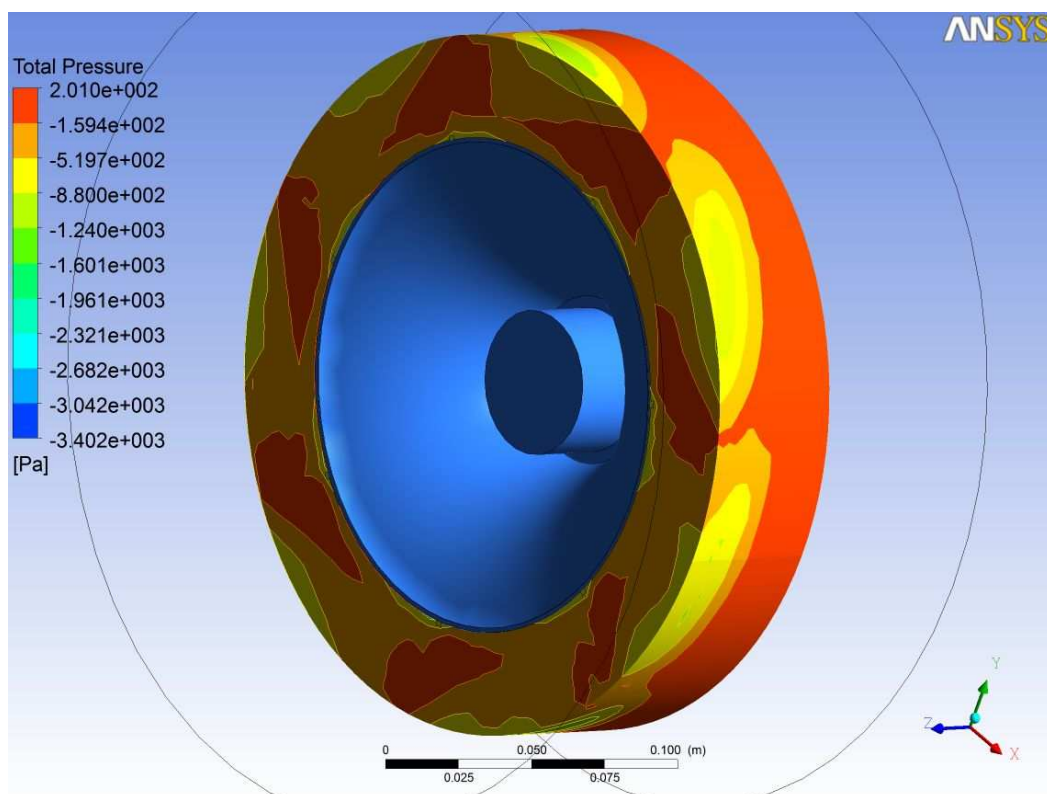
kde ρ [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] je hustota vzduchu, v [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] je průměrná rychlost proudění vzduchu a A [m^2] je plocha, přes kterou vzduch prochází.

Graf závislosti hmotnostního toku vypočteného z průměrné rychlosti je na Obr. 3-11. U takto získaného hmotnostního toku a jeho závislosti na počtu lopatek je již dobře vidět původní předpoklad, že hmotnostní tok bude s počtem lopatek růst s tím, že jeho nárůst bude s rostoucím počtem lopatek čím dál menší. U analyzovaného ventilátoru byl nárůst hmotnostního toku zřejmý až přibližně do devíti lopatek. Následné přidání jedné lopatky, již velké zvýšení nepřineslo. Nutno ovšem podotknout, že nárůst hmotnostního toku byl celkově velmi malý, a to i při nízkém počtu lopatek. Nárůst hmotnostního toku probíhal ovšem jen na jedné ploše, a to na ploše snímající proudění v radiálním směru (plocha u konce lopatek), což je u radiálního ventilátoru

samozřejmě žádoucí. Na druhé ploše (na konci ventilátoru) bylo proudění v podstatě konstantní a navíc podstatně menší. Nárůst hmotnostního toku mezi ventilátorem s dvěma lopatkami a jedenácti lopatkami (největší hmotnostní tok) na obou plochách, byl necelých dvacet procent, což není skutečně mnoho.

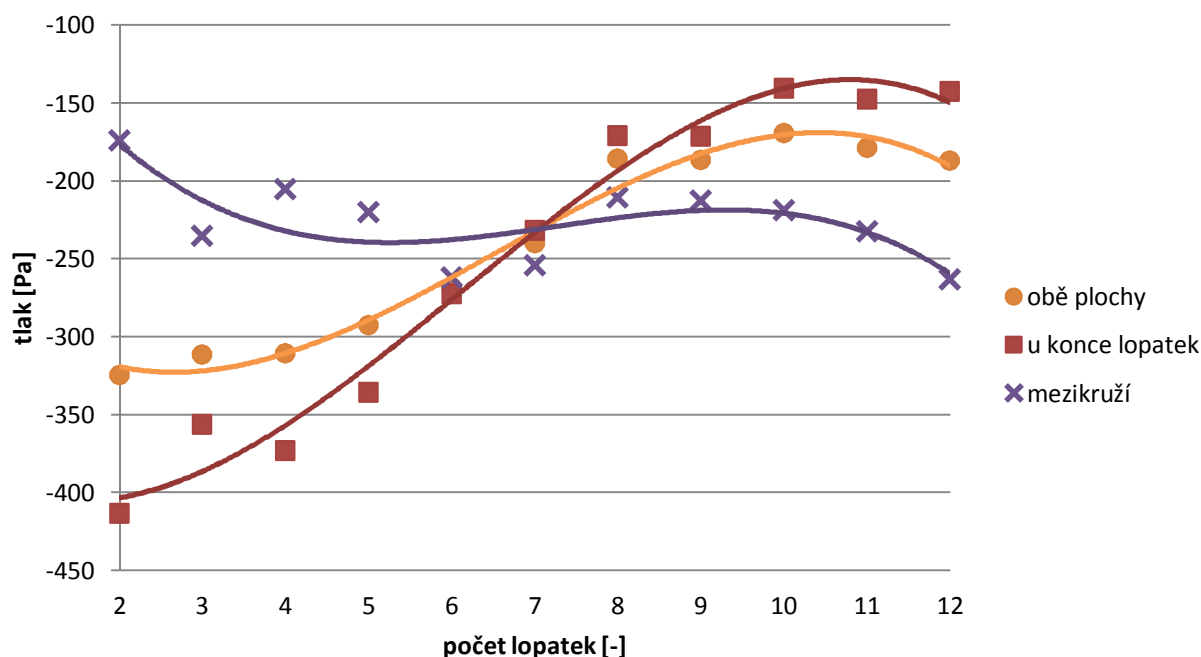


Obr. 3-11 Graf závislosti hmotnostního toku (vypočteného z rychlosti) na počtu lopatek



Obr. 3-12 Rozložení totálního tlaku na pomocných plochách ventilátoru se sedmi lopatkami

Je třeba se ještě podívat na tlak vyvolaný ventilátorem, který může mít také vliv na proudění strojem a to především, když bude muset ventilátor překonávat velkou tlakovou ztrátu způsobenou úzkou vzduchovou mezerou. Na Obr. 3-12 je zobrazeno rozložení totálního tlaku na obou pomocných rovinách pro ventilátor se sedmi lopatkami. Z obrázku je patrné, že se pohybujeme především v hodnotách 200 Pa až -1200 Pa. Větší část zde sice tvoří kladné hodnoty tlaku, ale zato záporné hodnoty tlaku (podtlak) zde dosahuje větších hodnot. Na obrázku je sice zobrazen ventilátor se sedmi lopatkami, ale rozložení tlaku je u ventilátorů s jiným počtem lopatek velmi podobné, jen s jinými hodnotami.



Obr. 3-13 Graf závislosti průměrného totálního tlaku na počtu lopatek

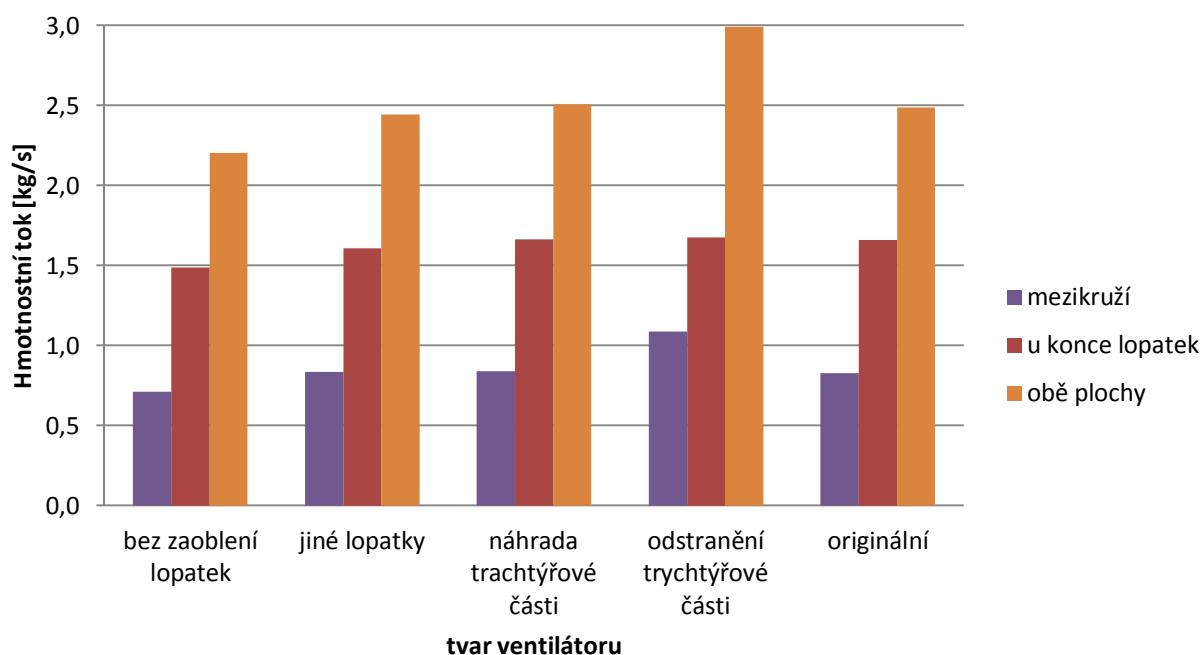
Při pohledu na Obr. 3-13, kde je vidět graf závislosti tlaku na počtu lopatek, je zřejmé, že se opravdu projeví větší hodnoty podtlaku a průměrné hodnoty tlaku se pohybují v záporných hodnotách. Průměrný tlak na mezikruží za ventilátorem se příliš nemění, zato průměrný tlak na ploše u konce ventilátoru ano. S rostoucím počtem lopatek vzrůstal průměrný tlak podobně jako hmotnostní tok a opět podobně jako tomu bylo v případě hmotnostního toku, se u devíti lopatek téměř zastavil. V obrázku je uvedena i průměrná hodnota tlaku na obou plochách, která je ovlivněna především tlakem na větší z dvou ploch, kterou je plocha u konce lopatek ventilátoru.

Z výše uvedeného rozboru je patrné, že zvyšování počtu lopatek nám zvyšuje jak hmotnostní tok, tak i tlak a to především v radiálním směru, což je pro tenhle typ ventilátoru podstatné. Vzhledem k malému nárůstu obou veličin pro vyšší počty lopatek má reálně smysl uvažovat o ventilátoru s devíti lopatkami. Větší počet lopatek než devět totiž přinese zlepšení jen minimální. Originální ventilátor měl lopatek sedm a v porovnání s ventilátorem s devíti lopatkami není rozdíl nijak markantní. Je zde sice nárůst jak hmotnostního toku, tak i tlaku, ale nijak zásadní. Z tohoto důvodu i následné modifikace budou vycházet z reálného ventilátoru se sedmi lopatkami.

3.4 Proudění ventilátoru pro různé tvary ventilátoru

Následující rozbor bude řešit vliv tvaru lopatek a tvaru samotného ventilátoru na množství a tlak vzduchu procházejícího ventilátorem. Jednotlivé modifikace ventilátoru jsou popsány

v kapitole 3.1 a každá z modifikací se od reálného originálního ventilátoru liší pouze jednou úpravou tak, aby bylo možné posoudit, jak která úprava ventilátor ovlivní.



Obr. 3-14 Graf závislosti hmotnostního toku (vypočteného z rychlosti) na tvaru ventilátoru

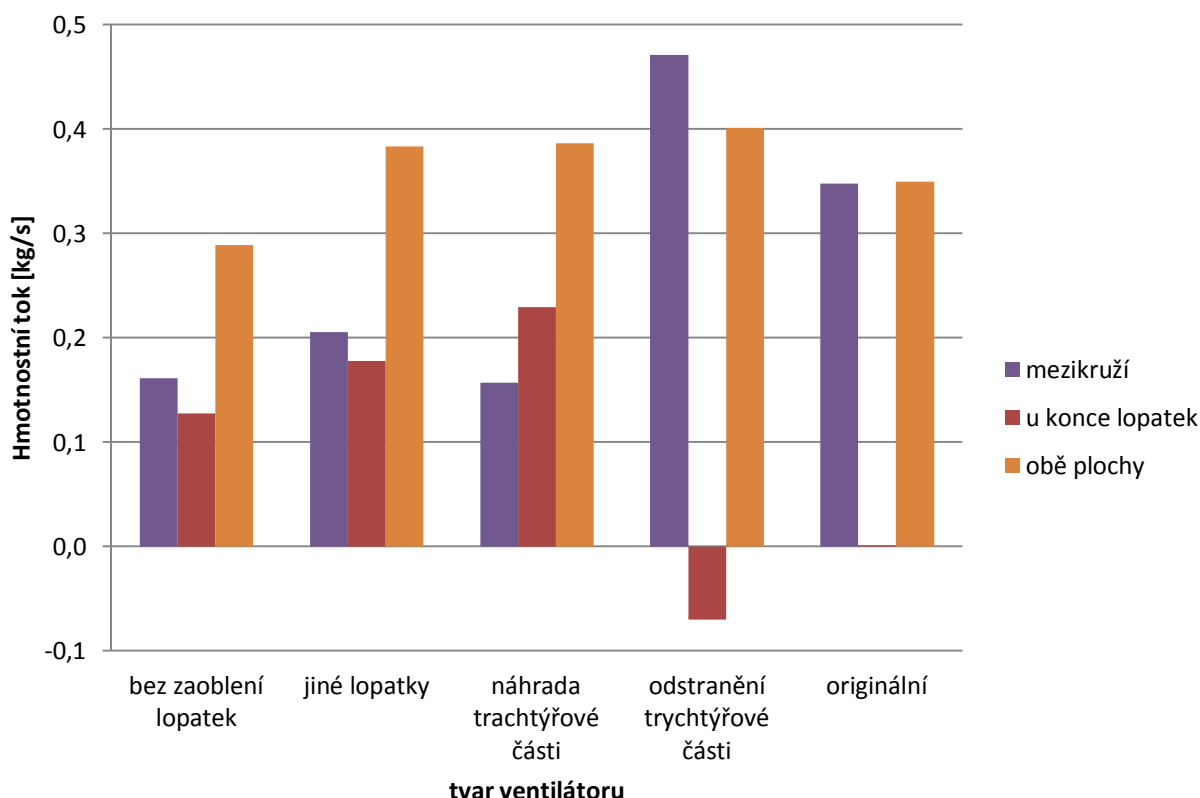
Graf závislosti hmotnostního toku (vypočteného z rychlosti) na tvaru ventilátoru je zobrazena na Obr. 3-14 a je z něj patrné, že dvě modifikace neznamenal pro ventilátor z hlediska množství vzduchu protékajícího ventilátorem žádnou výraznou změnu oproti originálnímu ventilátoru. Jedná se o ventilátor s upravenými lopatkami (Obr. 3.3b)) a ventilátor s náhradou trychtýřové části (Obr. 3.4a)).

Ventilátor s odstraněnou trychtýřovou částí (Obr. 3.4b)) dosahoval podobných hodnot jako originální pouze na straně u konce lopatek, ale na mezikruží u konce ventilátoru značně vyšších. To bylo způsobeno úplným otevřením zadní části ventilátoru, kudy mohl vzduch volně probíhat směrem za ventilátor, a také větší plochou, na které byl výpočet proveden (vnitřní průměr mezikruží byl mnohem menší). Zvětšení plochy bylo zvoleno proto, aby bylo možné zachytit veškeré proudění odcházející z ventilátoru. Otevření zadní části má ovšem za následek únik většího množství vzduchu právě za ventilátor, což je u radiálního ventilátoru nežádoucí. Takto vytvořený ventilátor pak již není radiální, ale axiální. Správně navržený kryt by tento nedostatek samozřejmě dokázal zmírnit, ale je samozřejmě žádoucí usměrňovat směr proudění vzduchu již přímo ventilátorem.

Překvapivě nejhůře dopadl ventilátor, u kterého byla provedena „nejmenší“ změna (Obr. 3.3a)). Odstranění zaoblení u lopatek způsobilo snížení hmotnostního toku ventilátoru na obou plochách již znatelně. Na drahou stranu ani zde nebylo snížení nijak výrazné (10 % – 15%).

Různé ovšem bylo ve všech případech rozložení proudění na každou pomocnou plochu. Na Obr. 3-15 je zobrazen graf průměrného hmotnostního toku vypočteného přímo Ansysem pro různé modifikace ventilátoru. Jak už bylo řečeno dříve, Ansys do výpočtu hmotnostního toku započítává kladné a záporné složky toku, takže se z výpočtu nedozvíme, jak silné proudění je. Lze z něj ovšem orientačně určit, zda-li je přes plochu vzduch více vytlačován ven z ventilátoru nebo naopak touto plochou ventilátor spíše vzduch nasává. Z grafu je tedy patrné, že originální

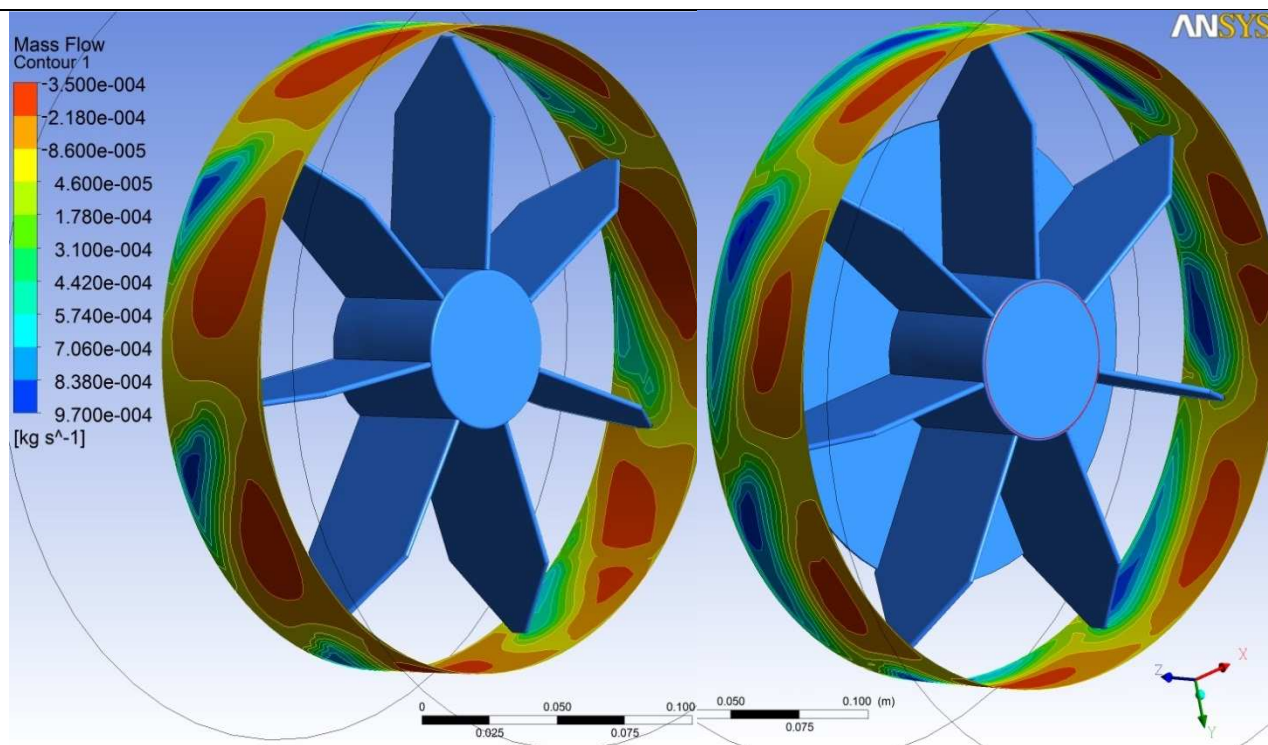
ventilátor plochou na konci lopatek stejnoměrně vzduch nasává a vytlačí, axiálnímu ventilátoru slouží plocha hlavně pro nasávání a u ostatních ventilátorů slouží plocha především k výtlaku. U mezikruží na konci ventilátoru je situace jednotvárnější, protože jí především k výtlaku používají všechny ventilátory. Dle předpokladu nejvíc axiální ventilátor (ventilátor s odstraněnou trychtýřovitou částí) následován originálním ventilátorem, ventilátorem s upravenými lopatkami, ventilátorem s lopatkami bez zaoblení a nakonec ventilátorem s nahrazenou trychtýřovitou částí. Mezi posledními dvěma je ovšem rozdíl minimální.



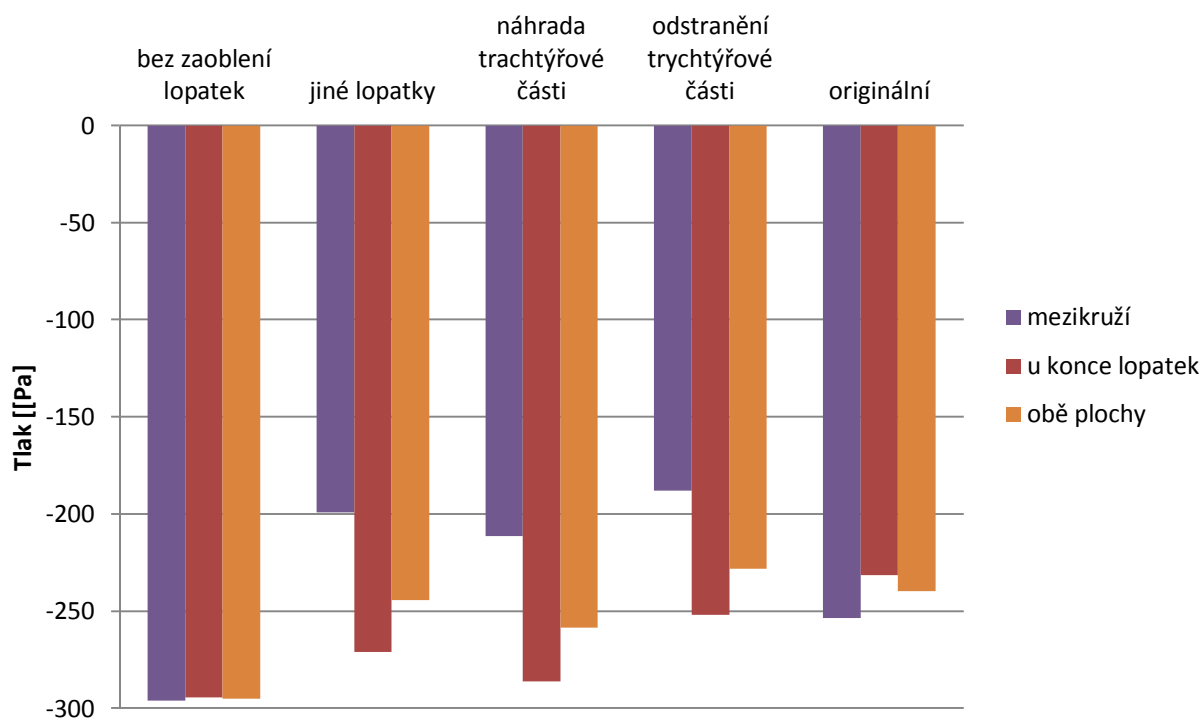
Obr. 3-15 Graf závislosti hmotnostního toku (vypočteného Ansysem) na tvaru ventilátoru

Potvrzením toho co bylo napsáno v posledním odstavci je Obr. 3-16, na kterém je zobrazeno porovnání proudění na ploše u konce lopatek dvou ventilátorů. Vlevo je ventilátor bez trychtýřovité části a vpravo je ventilátor s trychtýřovitou částí nahrazenou rovnou plochou. U prvního jmenovaného převládalo nasávání a druhý ventilátor plochu využíval hlavně k výtlaku (nejvíce ze všech ventilátorů). Toto potvrzují větší červené a oranžové plochy (znázorňující nasávání) na levém ventilátoru a větší modré a zelené plochy (zobrazující výtlak ventilátoru) na ventilátoru vpravo.

Pokud se podíváme na hodnoty průměrného tlaku, které jsou pro jednotlivé modifikace ventilátoru zobrazeny na Obr. 3-17, tak nejnižší hodnoty jsou opět vidět u ventilátoru bez zaoblených lopatek a nejvyšší opět u ventilátoru s odstraněnou trychtýřovitou částí. Zbylé tři ventilátory jsou na tom o něco hůře než ventilátor s odstraněnou trychtýřovitou částí. Nejlépe z trojice je na tom originální ventilátor a nejhůře ventilátor s nahrazenou trychtýřovitou částí. Rozdíly však jsou velmi malé. Rozložení tlaku pak je u všech ventilátorů velmi podobné originálnímu (Obr. 3-12). Liší se hlavně velikostí jednotlivých oblastí tlaku, zatímco jejich rozmístění na ploše a tvar je obdobné, stejně jak tomu bylo u hmotnostního toku (Obr. 3-16).



Obr. 3-16 Porovnání rozložení hmotnostního toku na ploše u konce lopatek ventilátorů s odstraněnou (vlevo) a změněnou (vpravo) trychtýřovitou částí



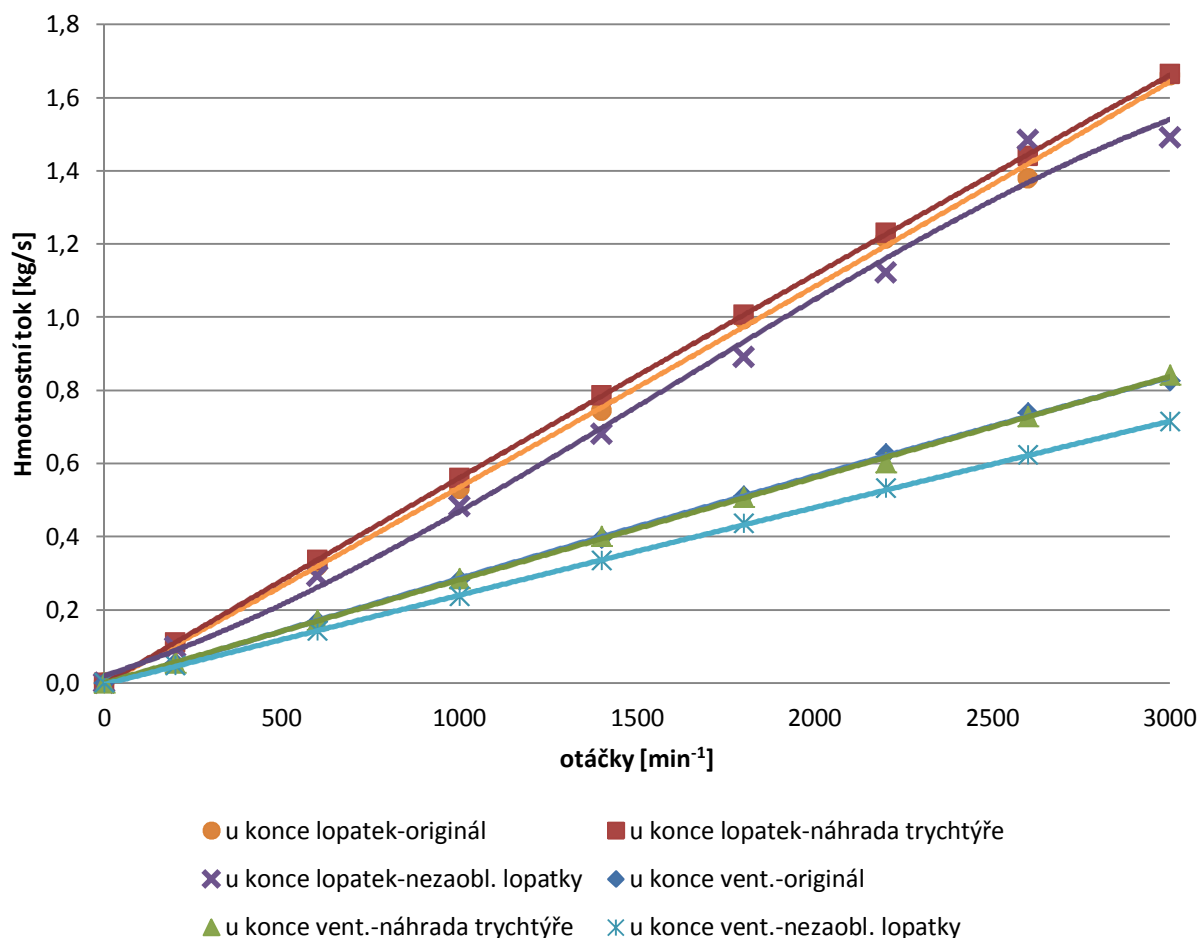
Obr. 3-17 Graf závislosti průměrného totálního tlaku na tvaru ventilátoru

Analýzovat všechny ventilátory pro různé otáčky by bylo velmi časově náročné. S ohledem na následnou analýzu spolu se synchronním strojem, která je náročná ještě více, byly vybrány tři ventilátory, se kterými bylo nadále pracováno. První z nich je samozřejmě originální ventilátor, protože se jedná o ventilátor reálný. Jako druhý byl vybrán ventilátor, u kterého byla nahrazena trychtýřovitá část rovnou částí, protože dosahoval největšího hmotnostního toku v radiálním

směru. Poslední ventilátor byl bez zaoblení lopatek, protože naopak vykazoval nejhorší výsledky z hlediska hmotnostního toku.

3.5 Proudění ventilátorů pro různé otáčky

Při zkoumání proudění pro různé otáčky byly tyto nejdříve nastaveny na 3000 min^{-1} a poté postupně snižovány po 400 min^{-1} . Tak jako v předchozích případech byl nejdříve zhodnocen hmotnostní tok vypočtený z rychlosti proudění. Jeho závislost na otáčkách je zobrazena na Obr. 3-18.

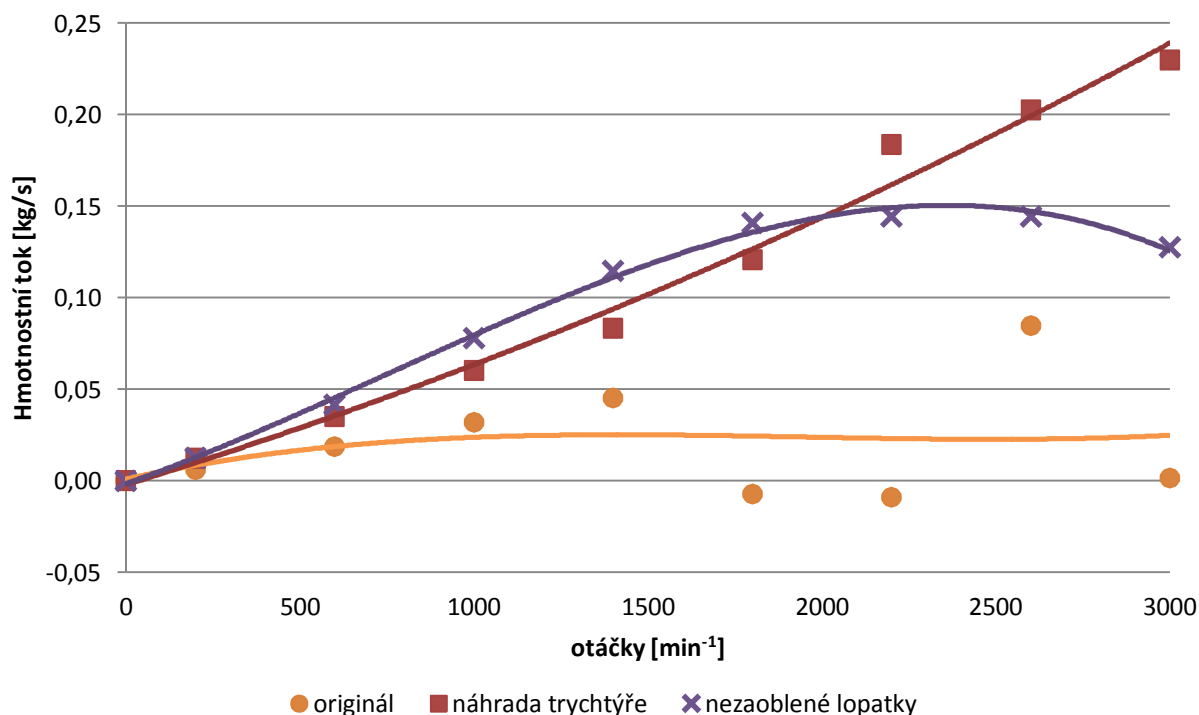


Obr. 3-18 Graf závislosti hmotnostního toku (vypočteného z rychlosti) na otáčkách ventilátorů

Z obrázku je patrné, že průběhy hmotnostního toku vztahující se k ploše u konce ventilátoru jsou pro jednotlivé ventilátory lineární. Křivky pro originální ventilátor a ventilátor s nahrazenou trychtýřovitou částí jsou totožné a překrývají se (liší se pouze ve dvou bodech). Tato lineární závislost se samozřejmě dala očekávat a podobně je tomu i u křivek vztahujících se k ploše u konce lopatek pro ventilátor originální a ventilátor s nahrazenou trychtýřovitou částí. U ventilátoru bez zaoblených lopatek již křivka zcela lineární není. Především poslední dvě hodnoty pro nejvyšší otáčky (2600 min^{-1} a 3000 min^{-1}) z křivky vybočují. Zatímco pro 2600 min^{-1} je zaznamenán nebyvalý nárůst hmotnostního toku oproti předešlé hodnotě 2200 min^{-1} , u poslední hodnoty (3000 min^{-1}) oproti předchozí hodnotě (2600 min^{-1}) není nárůst žádný. Zde se ovšem dá předpokládat, že u hodnoty pro 2600 min^{-1} se projevila nějaká chyba výpočtu, protože nebýt této hodnoty, byla by charakteristika také lineární, jako ostatní. Křivky pro celkový hmotnostní tok

přes obě plochy nejsou v obrázku uvedeny, protože by obrázek znepřehlednily a nebylo by na nich vidět nic zásadního.

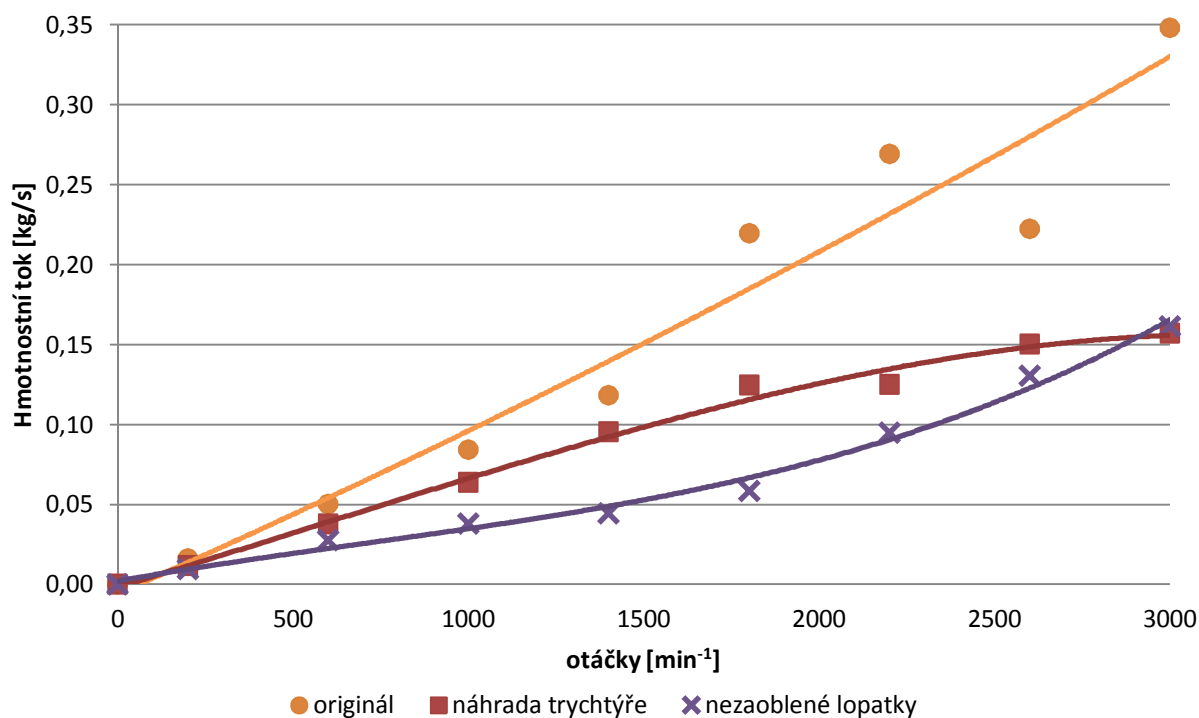
Je tedy zřejmé, že s rostoucími otáčkami roste celkové množství vzduchu proudícího ventilátorem přibližně lineárně. Není ovšem jasné, zda plochami ventilátor vzduch vytlačí nebo nasává, respektive jestli se poměry nasávání a výtlačku s otáčkami mění. Tato závislost je již více viditelná z Obr. 3-19, na kterém jsou závislosti hmotnostního toku vypočteného Ansysem pro plochu u konce lopatek. Jak již bylo totiž napsáno, Ansys počítá jak kladné, tak záporné hodnoty toku, a tím pádem je z výsledné hodnoty možno vyčíst, zda převažuje nasávání nebo výtlaček.



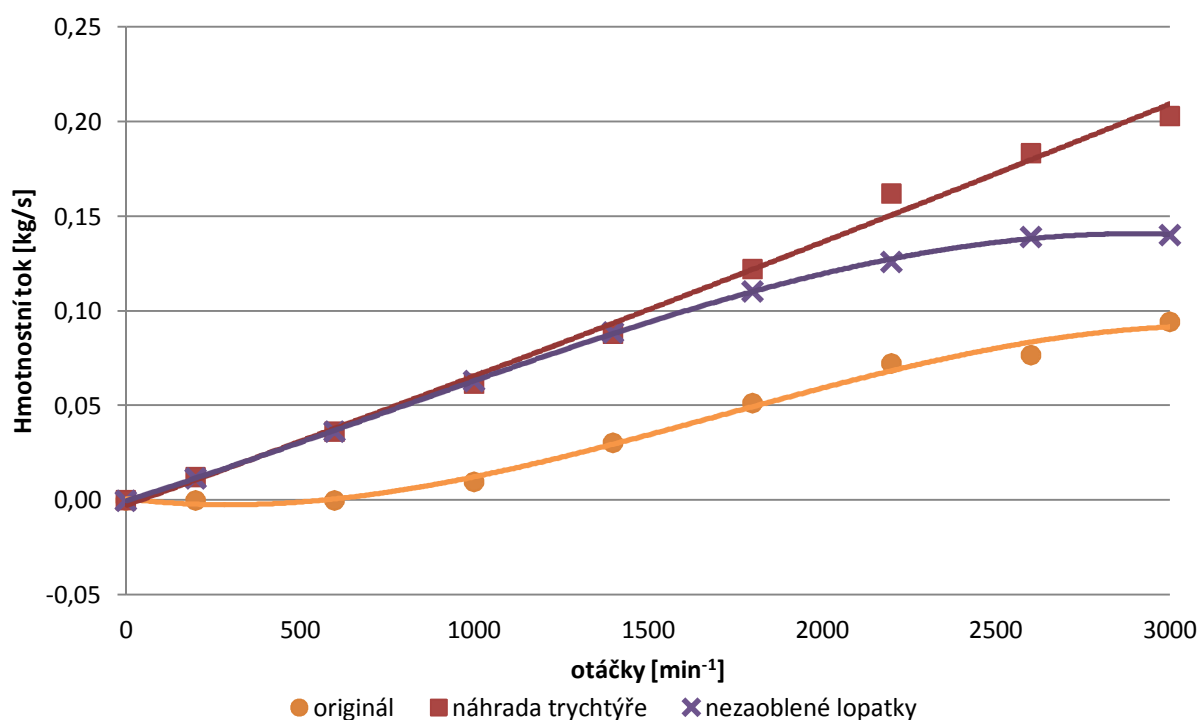
Obr. 3-19 Graf závislosti hmotnostního toku (vypočteného Ansysem) na otáčkách ventilátorů pro plochu u konce lopatek

Jak je vidět z Obr. 3-19, situace při růstu otáček již není tak jednoznačná, jak to vypadalo z hodnot vypočtených z rychlosti. Poměry ve ventilátorech se totiž se zvyšujícími otáčkami mohou podstatně měnit, jak je tomu například u ventilátoru originálního. U něj je situace hodně různorodá, protože při některých otáčkách převládá výtlaček a u jiných naopak sání. Všeobecně se však hodnoty pohybují kolem nuly s drobnou převahou výtlačku. Naproti tomu u ventilátoru s náhradou trychtýřovité části převládá na ploše u konce lopatek jednoznačně výtlaček, který navíc lineárně roste s otáčkami. U ventilátoru s nezaoblenými lopatkami je přibližně do 1500 min^{-1} situace obdobná jako u ventilátoru s nahrazenou trychtýřovitou částí (převaha výtlačku se lineárně zvyšuje). Od téhle hodnoty však přestává růst, stává se přibližně konstantní a s nejvyššími otáčkami dokonce mírně klesne.

Při pohledu na druhou vyhodnocovanou plochu (u konce ventilátoru) již nejsou změny tak pestré (Obr. 3-20). U všech ventilátorů převládá totiž výtlaček, který vzrůstá přibližně lineárně do hodnoty 1500 min^{-1} . Po téhle hodnotě nárůst u ventilátoru s nahrazenou trychtýřovitou částí trochu zvolní a u ventilátoru s nezaoblenými lopatkami naopak zrychlí. U originálního ventilátoru od hodnoty 1500 min^{-1} převaha výtlačku roste různě a jednou dokonce klesne.



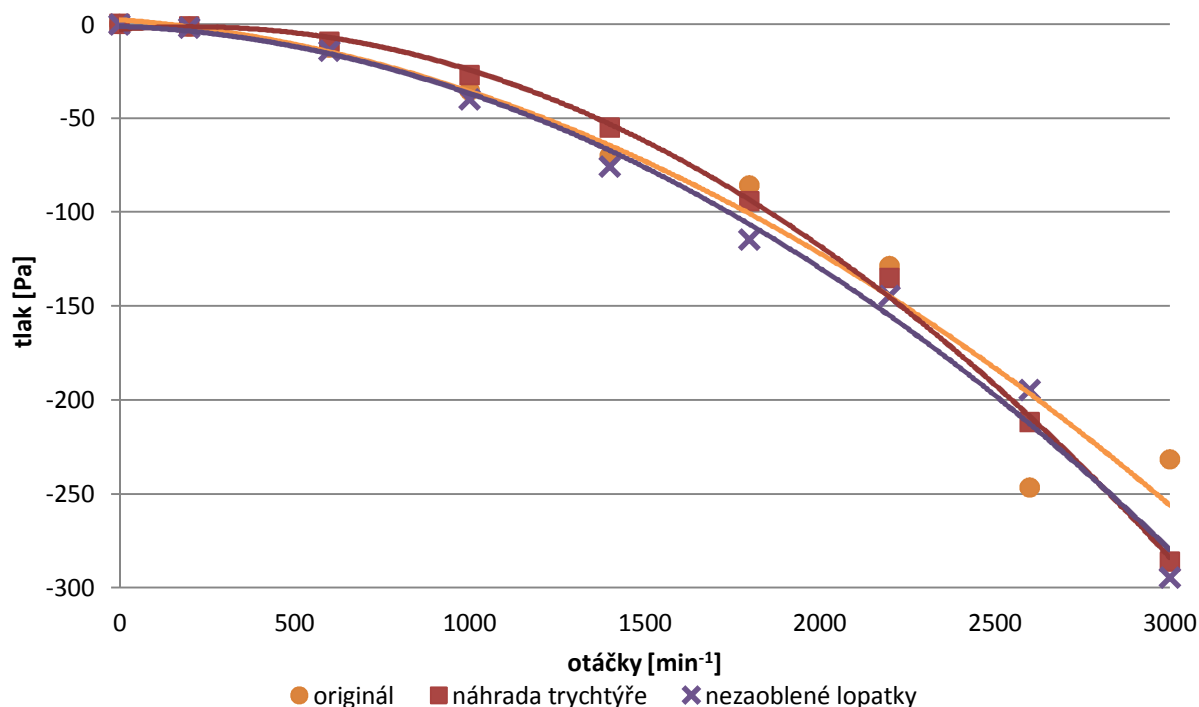
Obr. 3-20 Graf závislosti hmotnostního toku (vypočteného Ansysem) na otáčkách ventilátorů pro plochu u konce ventilátoru



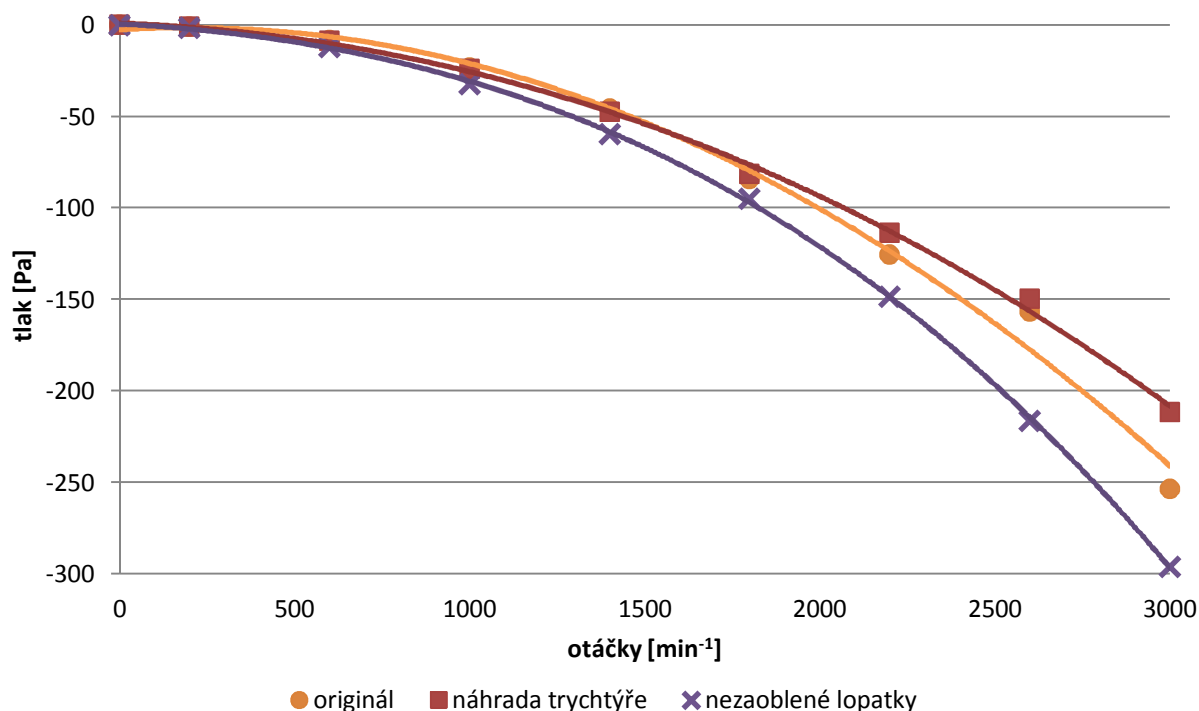
Obr. 3-21 Graf závislosti hmotnostního toku (vypočteného Ansysem) na otáčkách ventilátorů pro obě plochy dohromady

Na Obr. 3-21 je zobrazen hmotnostní tok pro obě plochy vypočtený Ansysem. Převaha výtaku a jeho lineární nárůst se dal u ventilátoru s nahrazenou trychtýřovitou částí předpokládat, protože byla situace podobná u obou ploch. Zato rozložení hmotnostního toku u originálního ventilátoru se trochu změnilo. Zde je do 600 min⁻¹ situace vyrovnaná (tj. nepřevládá výtak ani

sání) a od této hodnoty začne převládat výtlak a navíc převaha přibližně lineárně vzrůstá. U ventilátoru bez zaoblených lopatek pak převaha výtlaku lineárně roste do přibližně 1600 min^{-1} , poté se nárůst zvolní a u otáček asi 2600 min^{-1} úplně zastaví (tj. převaha výtlaku je konstantní).



Obr. 3-22 Graf závislost průměrného totálního tlaku na otáčkách ventilátorů pro plochu u konce lopatek



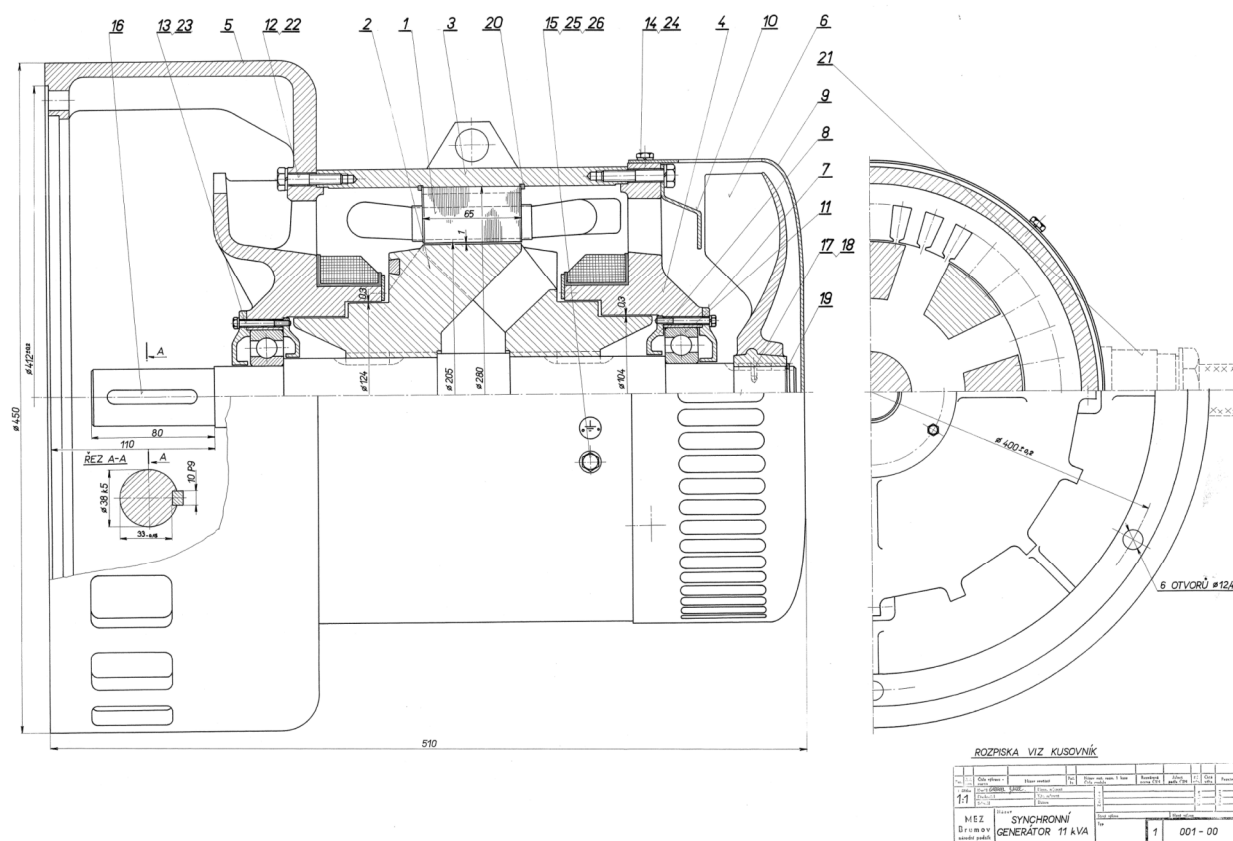
Obr. 3-23 Graf závislosti průměrného totálního tlaku na otáčkách ventilátorů pro plochu u konce ventilátoru



Při analýze změny tlaku při rostoucích otáčkách budou využity Obr. 3-22 a Obr. 3-23, které zobrazují závislosti pro jednotlivé plochy. Prvně zmíněný obrázek zobrazuje tlak pro plochu u konce ventilátorů a druhý pro plochu na konci ventilátoru. Na ploše u konce lopatek dochází u všech ventilátorů k poklesu tlaku přibližně exponenciálně se zvyšujícími se otáčkami a navíc u všech ventilátorů přibližně stejně. Na ploše u konce ventilátorů dochází u všech k poklesu také exponenciálně, jen u každého ventilátoru s trochu jinou intenzitou. Jen u originálního ventilátoru při hodnotě 2600 min^{-1} došlo na ploše u konce lopatek k většímu snížení tlaku a na ploše u konce ventilátor naopak byl pokles menší.

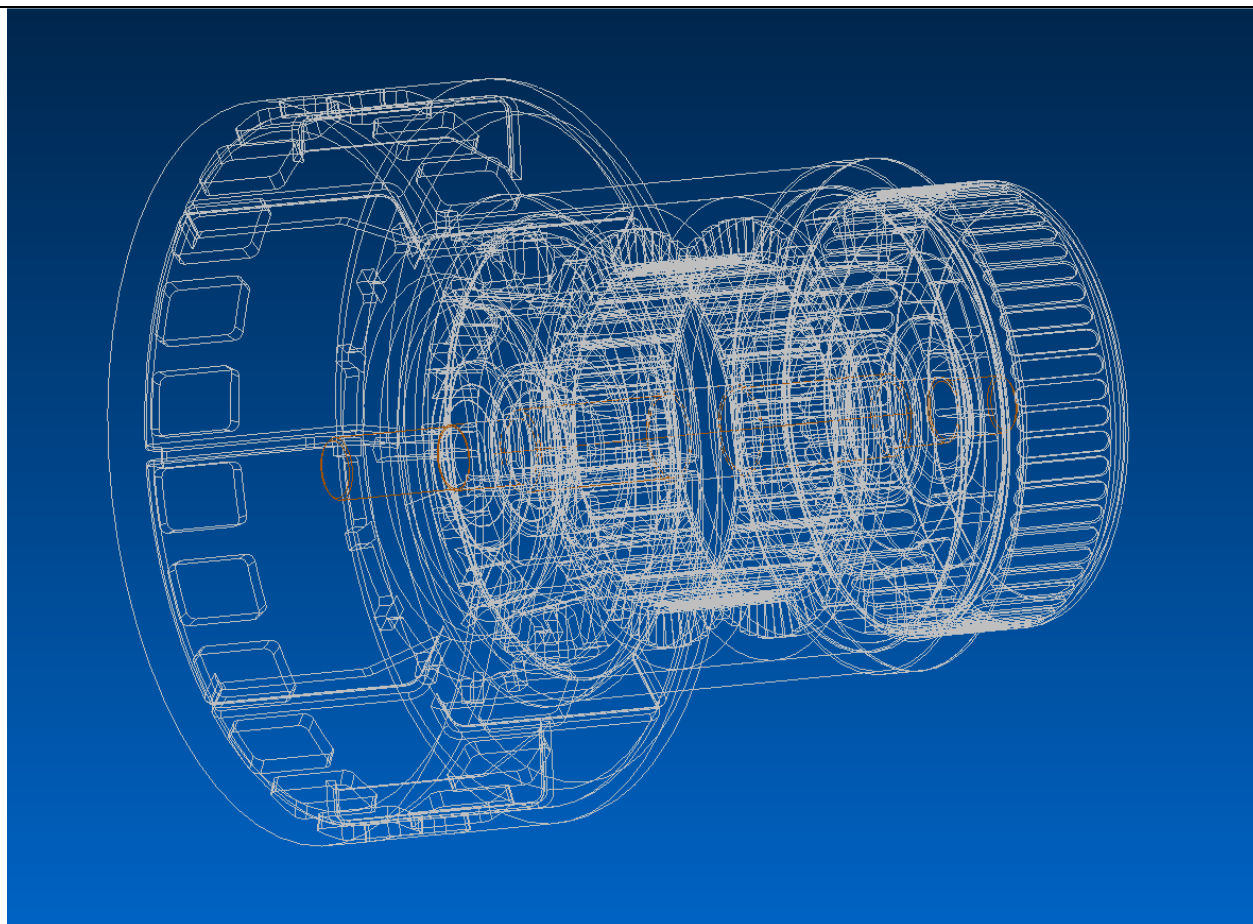
4 PROUDĚNÍ V SYNCHRONNÍM GENERÁTORU

Po analýze samotného ventilátoru je potřeba propojit ventilátor se zadaným synchronním strojem. Jedná se o synchronní generátor s hladkým rotorem o výkonu 11 kVA. Výrobce je MEZ Brumov. Výkres generátoru, podle kterého byl vytvořen jeho model, je možné vidět na Obr. 4-1, na kterém jsou také vidět hlavní rozměry generátoru. Bohužel z výkresu není možné vyčíst ani odměřit veškeré detaily stroje, a z tohoto důvodu musely být některé rozměry při tvorbě modelu odhadnuty.



Obr. 4-1 Výkres analyzovaného generátoru

Zjednodušený model byl vytvořen stejně jako ventilátor v programu Autodesk Inventor Professional 2012 a je zobrazen na Obr. 4-2. Zjednodušeny byly samozřejmě jen ty části, které nemají podstatný vliv na proudění. Model byl vytvořen jako sestava součástí, tzn. byly vytvořeny jednotlivé součásti (hřídel, rotor, stator, fréma apod.) a ty byly vloženy do jedné sestavy včetně ventilátoru a jeho krytu. Tato metoda byla zvolena kvůli snadnější orientaci během modelování, ale hlavně, aby po importu do programu Ansys bylo možné pracovat s jednotlivými díly (např. nastavit, které části se budou otáčet, a které nikoliv). Model byl úmyslně vytvořen uzavřený ze strany volného konce hřídele, protože zde bude osazen turbínou (nebo jiným pohonem) a velký otvor by podstatně ovlivňoval proudění. Další změnou, která byla provedena oproti originálnímu generátoru, byl zmenšený průměr krytu ventilátoru. Tato změna byla provedena z důvodu menšího průměru analyzovaných ventilátorů oproti ventilátoru na výkrese generátoru.



Obr. 4-2 Model analyzovaného generátoru v programu Autodesk Inventor Professional 2012

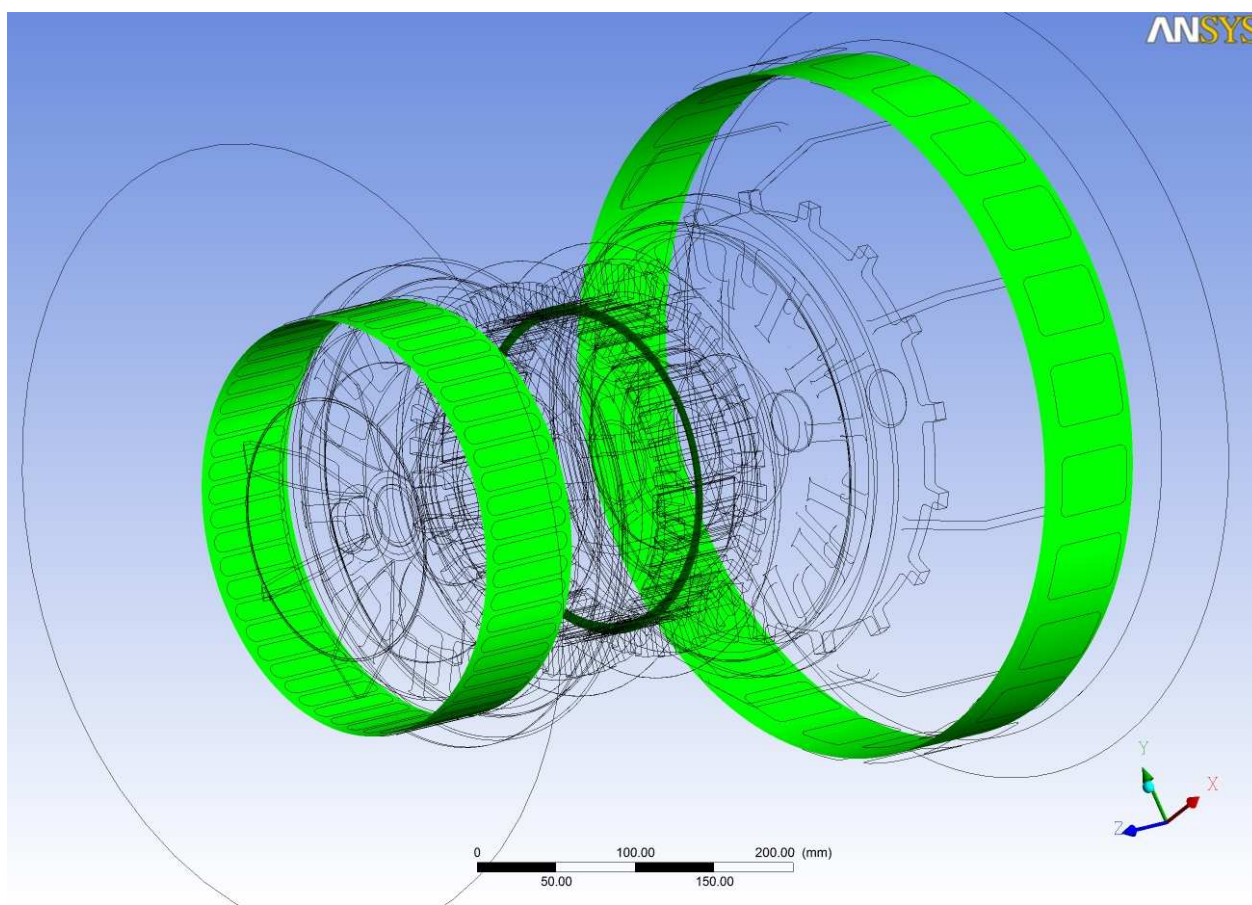
4.1 Nastavení a výpočet proudění v generátoru v Ansys CFX

Nastavení pro výpočet proudění v generátoru vycházela z nastavení výpočtů pro samostatný ventilátor. Opět musel být celý model kompletně uzavřen do pomyslného vzduchového válce v komponentě Design modeler a byla vytvořena výpočetní síť v komponentě Meshing. Nebyla ovšem použita funkce suppress body, což bylo možné jen pro samotný ventilátor, kde byla jen jedna geometrie.

V CFX-Pre pak byl nastaven stejný referenční tlak (1 atm) a teplota vzduchu (25°C). Části, které mají rotovat, byly nastaveny s příslušnými otáčkami jako rotující a zbylé části jako stacionární. Každá část generátoru byla nastavena jako samostatná doména a muselo být nastavena rozhraní mezi nimi, tzn. plochy, které jsou společné pro dvě součásti. Podle toho, zda se dvě části vůči sobě otáčely (např. rozhraní fréma, jejíž součástí jsou i ložiska a hřídel) nebo vůči sobě neotáčely (rozhraní rotor a hřídel), byly v záložce Frame Change/Mixing model nastaveny jako rotational periodicity respektive frozen rotor. Všechny plochy pomyslného válcového uzavření byly opět nastaveny jako opening, stacionární a s relativním tlakem 0 Pa.

Výpočty byly prováděny pro generátor postupně se třemi vybranými ventilátory, které byly samostatně analyzovány pro různé otáčky v kapitole 3.5. Otáčky byly pro jednotlivé případy měněny po 600 min^{-1} . Oproti analýze samotných ventilátorů byl tedy snížen počet výpočtů, protože jeden výpočet generátoru trval 7-8 hodin, což je mnohem více oproti 1-2 hodinám pro jeden výpočet samotného ventilátoru.

Řešení opět obstarala komponenta CFX-solver. V komponentě CFX-Pro byly opět vytvořeny pomocné roviny tak, aby na nich bylo možné výsledky vhodně vyhodnotit. Tentokrát se jednalo o tři roviny opět vytvořené pomocí funkce Surface of revolution. Všechny jsou zeleně znázorněny na Obr. 4-3. První z rovin je mezikruží vytvořené v pomyslném řezu vedeného napříč strojem uprostřed rotoru tak, aby na rovině bylo možné analyzovat proudění vzduchu procházejícího vzduchovou mezerou (prostřední rovina na Obr. 4-3). Druhá rovina byla vedena středem ventilačních otvorů v krytu generátoru u volného konce hřídele tak, aby bylo možné analyzovat proudění přes tyto otvory (rovina vpravo na Obr. 4-3). Poslední rovina byla vedena středem otvorů v krytu ventilátoru (rovina vlevo na Obr. 4-3) opět kvůli analýze proudění přes otvory v krytu.



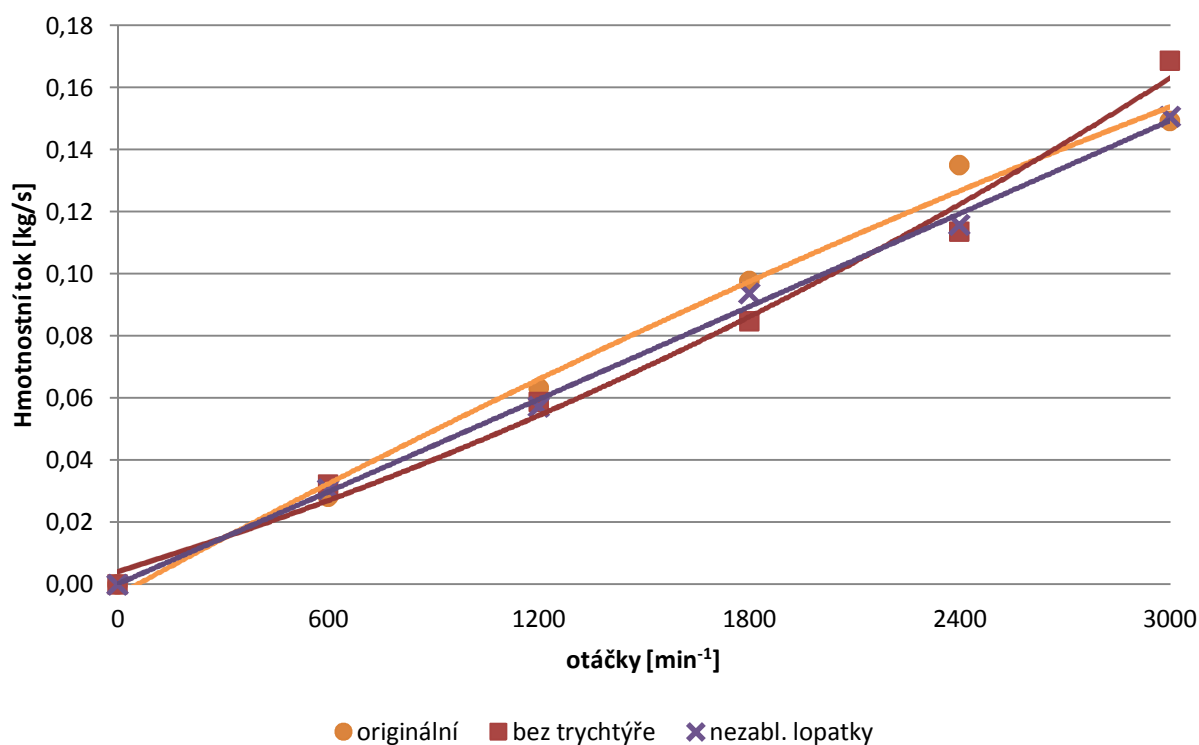
Obr. 4-3 Pomocné vyhodnocovací roviny v generátoru v komponentě CFD-post

4.2 Výsledky a vyhodnocení proudění v generátoru

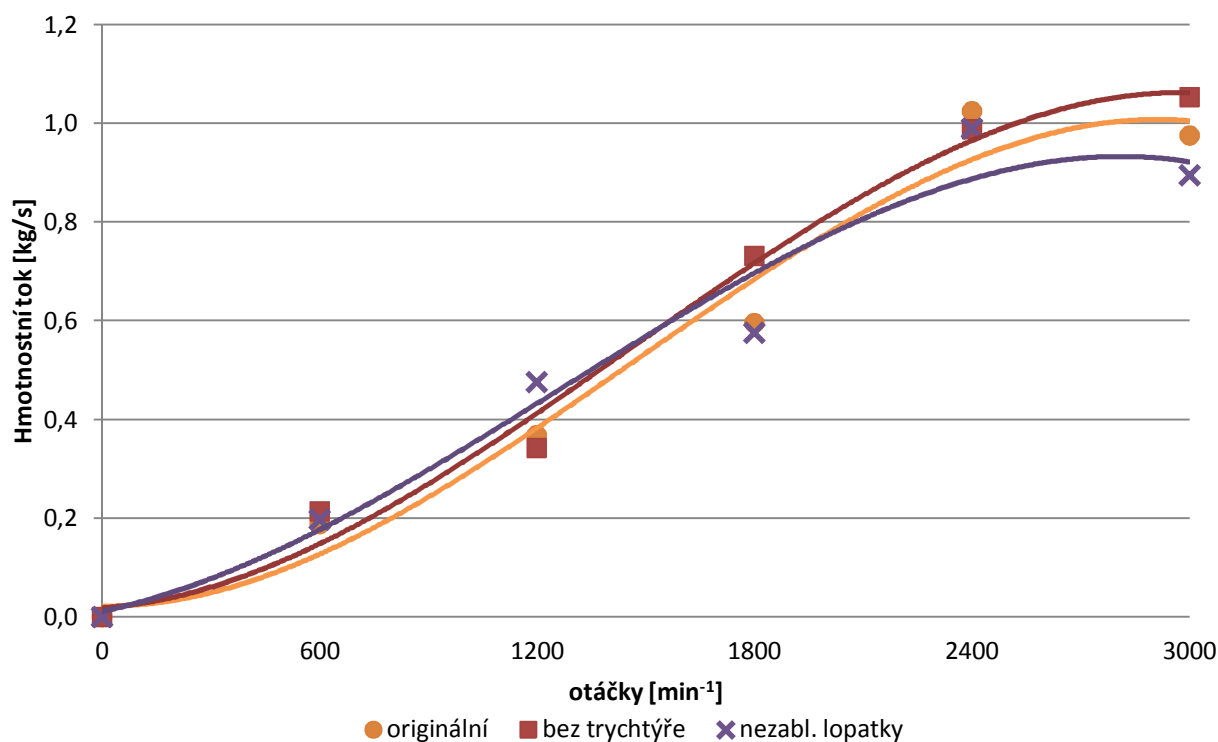
4.2.1 Hmotnostní tok vypočtený z rychlosti

Analýza bude započata hmotnostním tokem vypočteným z rychlosti na mezikruží ve vzduchové mezeře, respektive závislosti hmotnostního toku na otáčkách. Na Obr. 4-4 jsou zobrazeny závislosti hmotnostního toku na otáčkách pro jednotlivé typy generátorů. Z grafů je patrný nárůst hmotnostního toku opět přibližně lineární pro všechny tři typy ventilátorů s tím, že s měnícími se otáčkami se mění i pořadí ventilátorů při porovnání hmotnostního toku proudícího přes vzduchovou mezeru. Rozdíly však nejsou velké. Velikost hmotnostního toku přes vzduchovou mezeru sice není příliš velká (nejvyšší průtok přibližně $0,17 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$), ale vzhledem

k velikosti vzduchové mezery (1 mm) se jedná o poměrně velké množství, uvážíme-li, že tato hodnota odpovídá objemu přibližně $130 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$.

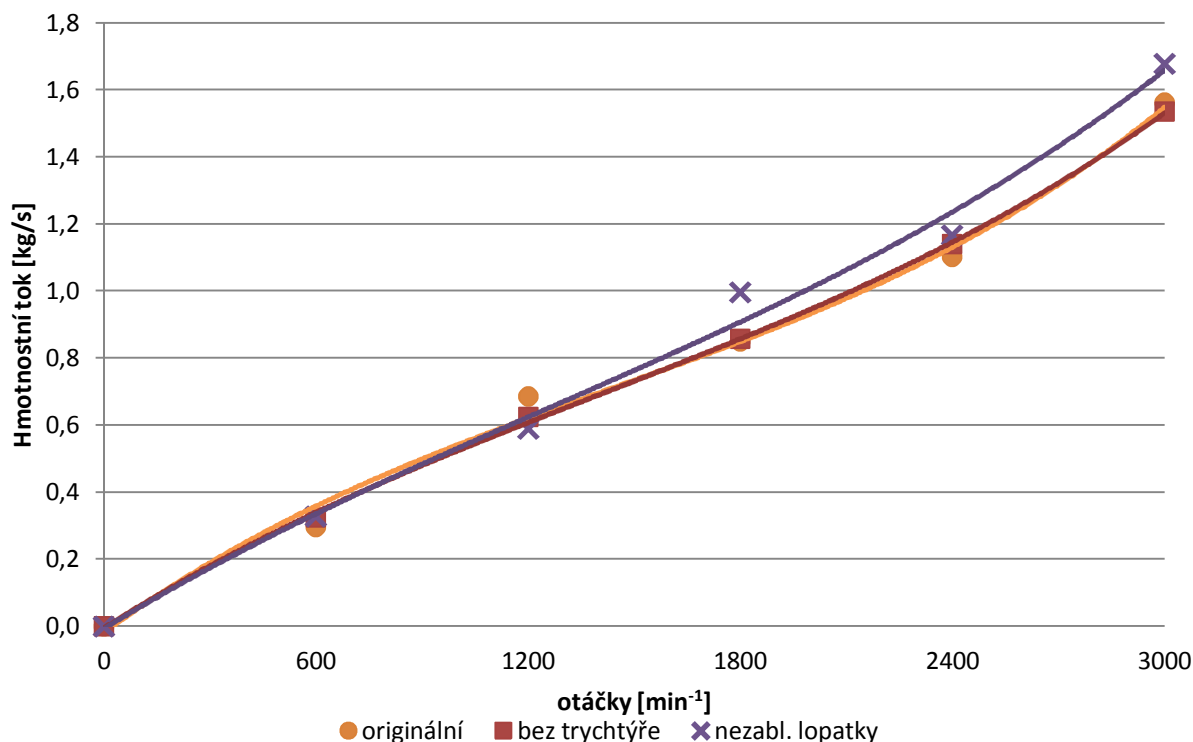


Obr. 4-4 Graf závislosti hmotnostního toku (vypočteného z rychlosti) na otáčkách na ploše ve vzduchové mezeře



Obr. 4-5 Graf závislosti hmotnostního toku (vypočteného z rychlosti) na otáčkách na ploše u volného konce hřídele

Při pohledu na závislosti hmotnostního toku na ploše u volného konce hřídele je vidět, že zde se již nejedná o lineární nárůst hmotnostního toku (Obr. 4-5). O lineárním nárůstu se dá ještě relativně mluvit přibližně mezi 1000 min^{-1} a 2000 min^{-1} . V rozmezí zbývajících otáček je nárůst pozvolnější. Opět zde dochází k tomu, že pro každé otáčky vytváří nejvíce hmotnostního toku jiný ventilátor. Zde jsou hodnoty hmotnostního toku přibližně šestkrát až sedmkrát vyšší než ve vzduchové mezeře.



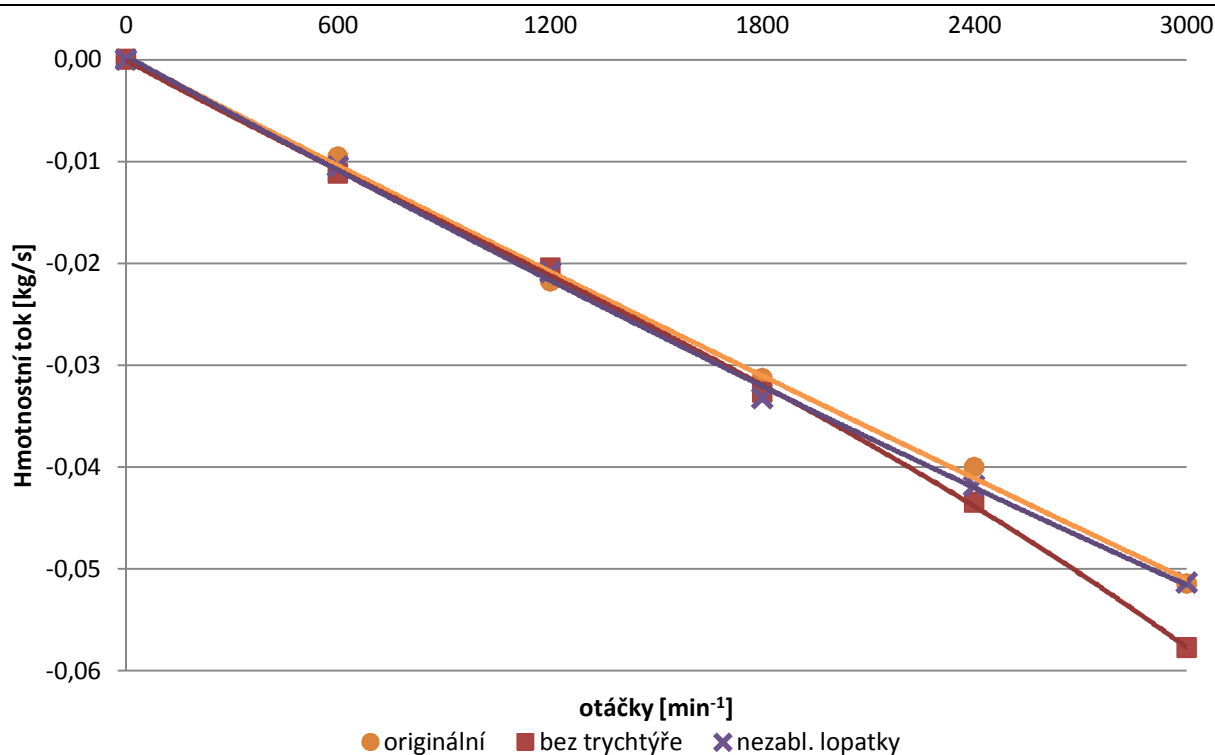
Obr. 4-6 Graf závislosti hmotnostního toku (vypočteného z rychlosti) na otáčkách na ploše u ventilátoru

Na poslední analyzované ploše (plocha u ventilátoru) vypadá nárůst hmotnostního toku s rostoucími otáčkami také téměř lineárně, jen při těch nejvyšších otáčkách je nárůst ještě o něco intenzivnější. Hodnoty hmotnostního toku jsou pak přibližně o 50% vyšší, než tomu bylo v případě roviny u volného konce hřídele.

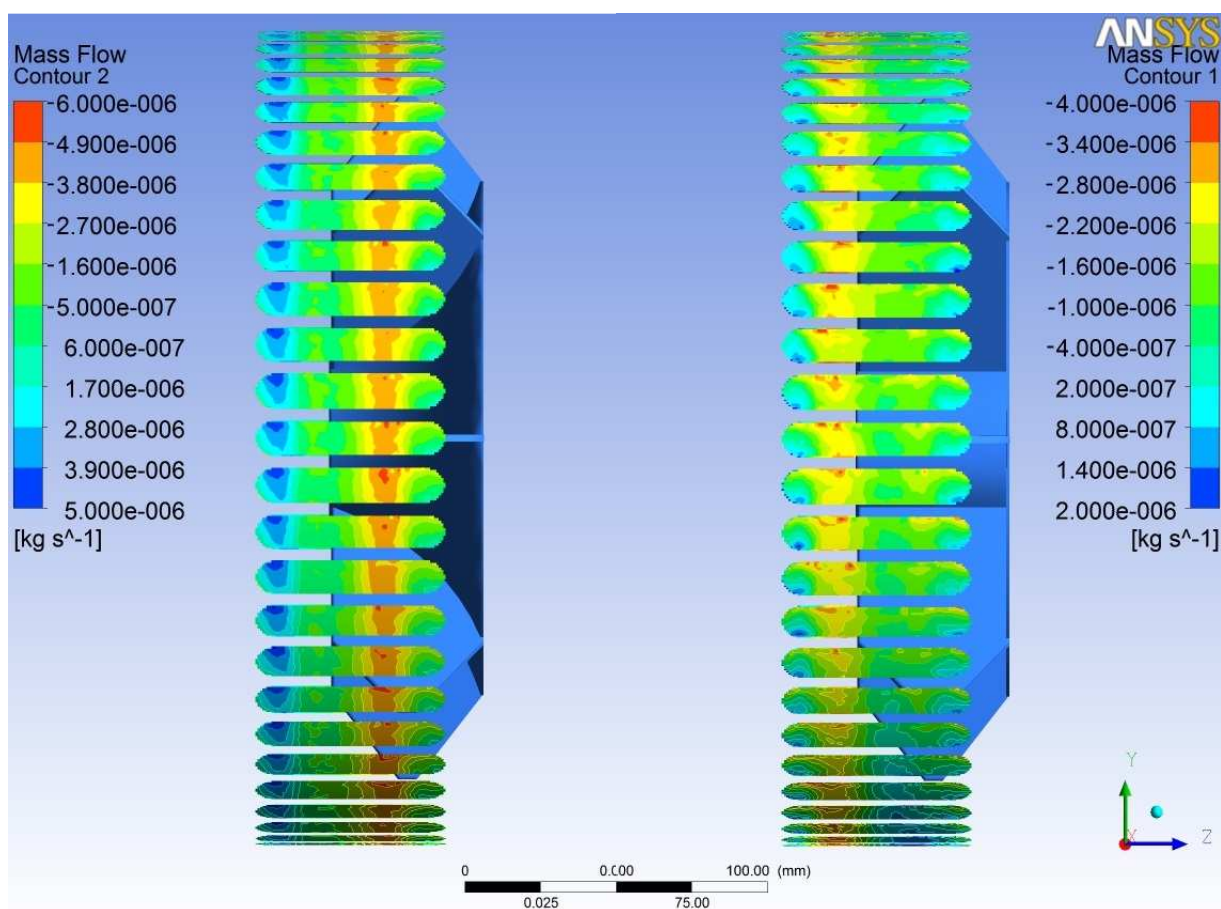
4.2.2 Hmotnostní tok vypočtený programem Ansys CFX

V předchozí kapitole (4.2.1) bylo ukázáno, jak se mění množství vzduchu procházejícího přes pomocné vyhodnocovací plochy u jednotlivých druhů ventilátorů v závislosti na otáčkách. Jedná se ovšem o množství proudící všemi směry a není tedy jasné, zda přes plochu vzduch spíše vstupuje do generátoru nebo odchází. To bude náplní této kapitoly.

Na Obr. 4-7 je jako první zobrazena závislost hmotnostního toku na ploše u ventilátoru. Je zde pokles do záporných hodnot hmotnostního toku, což znamená, že vzduch proudí přes tuto plochu (respektive přes otvory v krytu ventilátoru) především dovnitř stroje. Závislosti jsou opět téměř lineární (nárůst hmotnostního toku přibližně $0,01 \text{ kg}$ na 600 min^{-1}) pro všechny stroje, jen pro ventilátor s náhradou trychtýřovité části dochází u otáček nad 2400 min^{-1} k zvětšení nárůstu proudícího vzduchu.

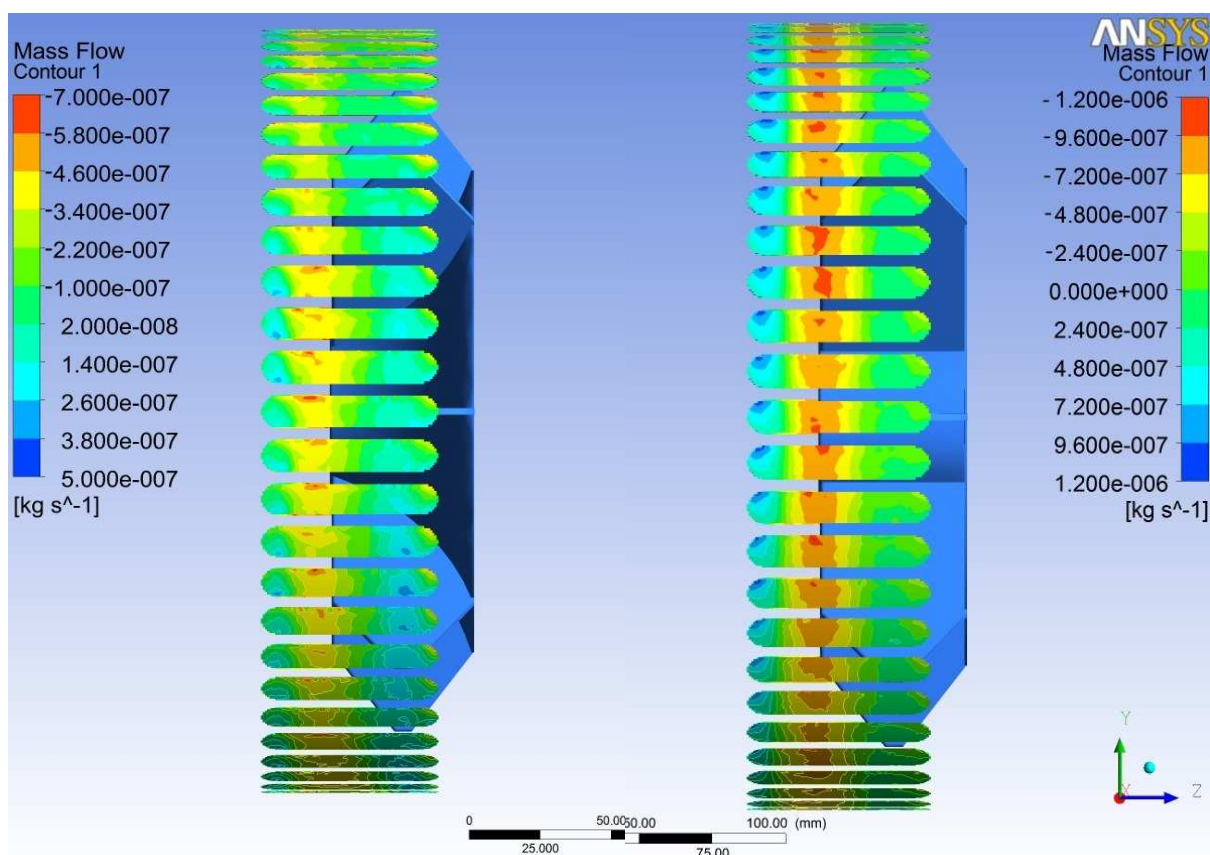


Obr. 4-7 Graf závislosti hmotnostního toku (vypočteného Ansysem) na otáčkách na ploše u ventilátoru



Obr. 4-8 Rozložení hmotnostního toku přes otvory v krytu ventilátoru originálního (vlevo) a ventilátoru s nahrazenou trychtýřovitou částí (vpravo) pro otáčky 3000 min⁻¹

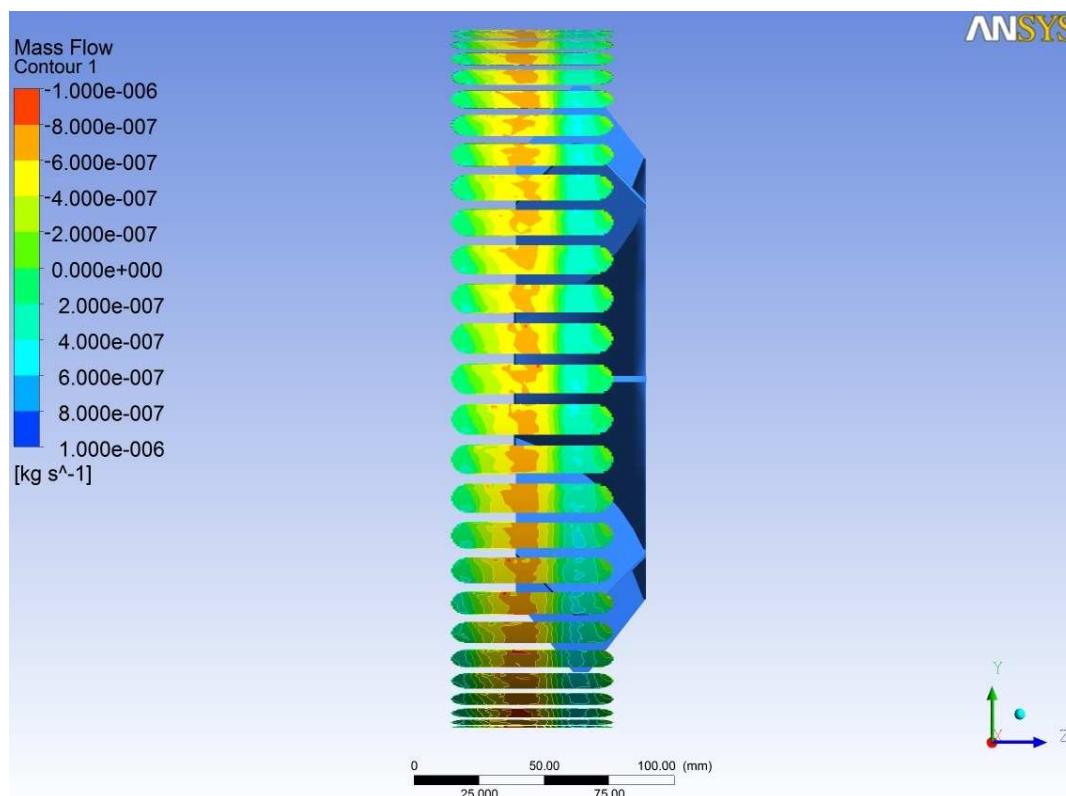
Z hlediska výše uvedeného vypadá hmotnostní tok na ploše u ventilátoru pro všechny ventilátory hodně podobně. Co se ovšem na ploše mění je rozložení hmotnostního toku ventilátorů. Na Obr. 4-8 jsou zobrazeny dvě odlišné situace pro otáčky 3000 min^{-1} . Vlevo je rozložení hmotnostního toku pro originální ventilátor včetně legendy a vpravo je rozložení pro ventilátor s nahrazenou trychtýřovitou částí. Je vidět, že u originálního ventilátoru vchází velké množství vzduchu ze stroje v částech otvorů nad koncem lopatek (na obrázku pravá polovina otvoru) a u kraje levé části otvorů je naopak velké množství vzduchu vytlačeno ven ze stroje. U druhého ventilátoru není výtlak v levé části tak silný a navíc je hned vedle části s výtlakem poměrně silné sání. V pravé polovině otvorů se pak nachází výtlak i sání, ale nijak zvlášť silné. Obecně lze pak konstatovat, že u originálního ventilátoru se vyskytuje více extrémů (více malých ploch se silným prouděním), a to ať už sání nebo výtlaku, a u druhého ventilátoru se přílišné extrémy nevyskytují. Sání pomalu přechází ve výtlak a opačně a nevyskytují se tu velké hodnoty hmotnostního toku. Nutno podotknout, že u ventilátoru s nahrazenou trychtýřovitou částí je úmyslně zvolen menší rozsah zobrazovaných hodnot (viz. legenda) tak, aby bylo možné lépe zobrazit rozložení hmotnostního toku. Třetí ventilátor (ventilátor bez zaoblení u lopatek) zde není zobrazen, protože rozložení hmotnostního toku je pro něj téměř totožné jako u originálního ventilátoru.



Obr. 4-9 Rozložení hmotnostního toku přes otvory v krytu ventilátoru originálního (vlevo) a ventilátoru s nahrazenou trychtýřovitou částí (vpravo) pro otáčky 600 min^{-1}

Při pohledu na Obr. 4-9, kde je zobrazeno stejné zobrazení jen pro otáčky 600 min^{-1} , je pak možné pozorovat změnu v rozložení proudění u originálního ventilátoru. Samozřejmě ke změně došlo u obou ventilátorů, ale zatímco u ventilátoru s nahrazenou trychtýřovitou částí především množství toku (ne jeho rozložení v otvoru), u originálního ventilátoru se hmotnostní tok rozložil

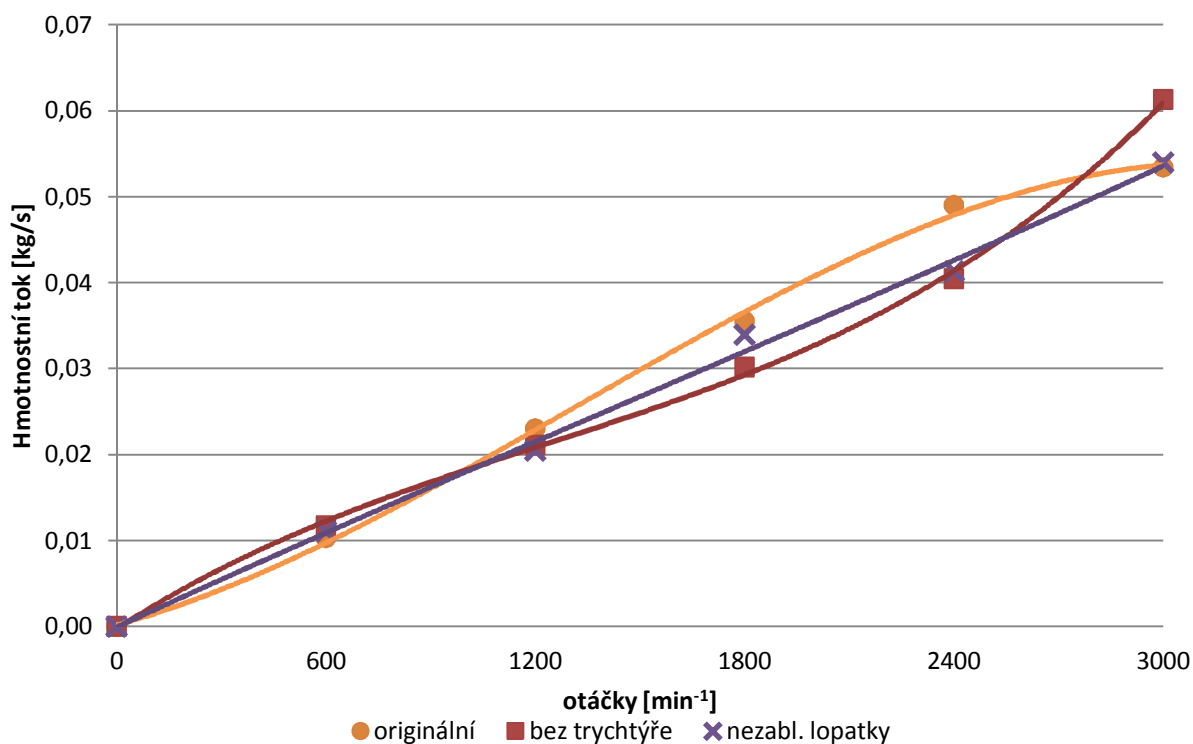
podobně jako právě u ventilátoru s nahrazenou trychtýřovitou částí. Dokonce je nyní rozložení ještě více rovnoměrnější. V tomto případě byl nastaven menší rozsah zobrazení hmotnostního toku právě u originálního ventilátoru. Změna je tak ve skutečnosti ještě větší než jak vypadá na obrázku. Ventilátor bez zaoblení u lopatek je na tom při otáčkách 600 min^{-1} z hlediska rovnoměrnosti rozložení toku přibližně mezi oběma zbývajících ventilátory, jak je možné vidět na Obr. 4-10. Nejsou u něj takové extrémy jako u ventilátoru s trychtýřovitou částí, ale ani nemá rozložení toku tak rovnoměrné jako u originálního ventilátoru. Rozsah zobrazení je zde zvolen menší než u ventilátoru s nahrazenou trychtýřovitou částí, ale větší než u originálního ventilátoru.



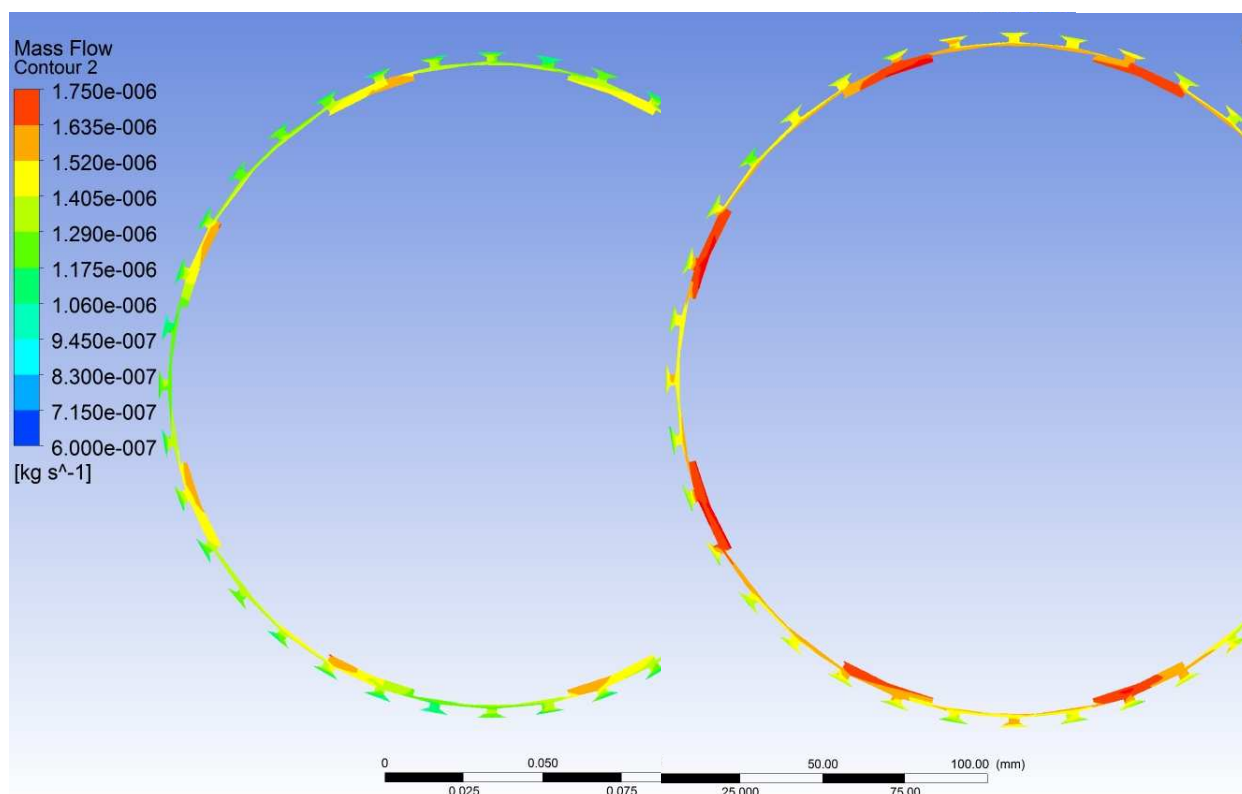
Obr. 4-10 Rozložení hmotnostního toku přes otvory v krytu ventilátoru bez zaoblených lopatek pro otáčky 600 min^{-1}

Z analýzy na ploše u ventilátoru je tedy patrné, že otvory u ventilátoru slouží především k přívodu vzduchu do stroje. Dá se tedy předpokládat, že stejné množství vzduchu, jaké je sáno do stroje přes zmiňované otvory, bude procházet přes vzduchovou mezru a vystupovat ze stroje přes otvory v krytu stroje u volného konce hřídele.

Tenhle předpoklad částečně potvrzuje i Obr. 4-11, na kterém je zobrazena závislost hmotnostního toku přes plochu ve vzduchové mezeře na otáčkách stroje pro všechny tři druhy ventilátorů. Je vidět, že průběhy jsou co do velikosti podobné jako na ploše u ventilátoru, jen se záporné hodnoty změnily v kladné. Drobné rozdíly mezi hodnotami na ploše u ventilátoru a ploše ve vzduchové mezeře jsou způsobeny především nepřesnostmi ve výpočtech. Jedna věc se ovšem potvrdila a tou je větší nárůst hmotnostního toku při nejvyšších otáčkách (3000 min^{-1}) pro ventilátor s náhradou trychtýřovité části.



Obr. 4-11 Graf závislosti hmotnostního toku (vypočteného Ansysem) na otáčkách na ploše ve vzduchové mezeře



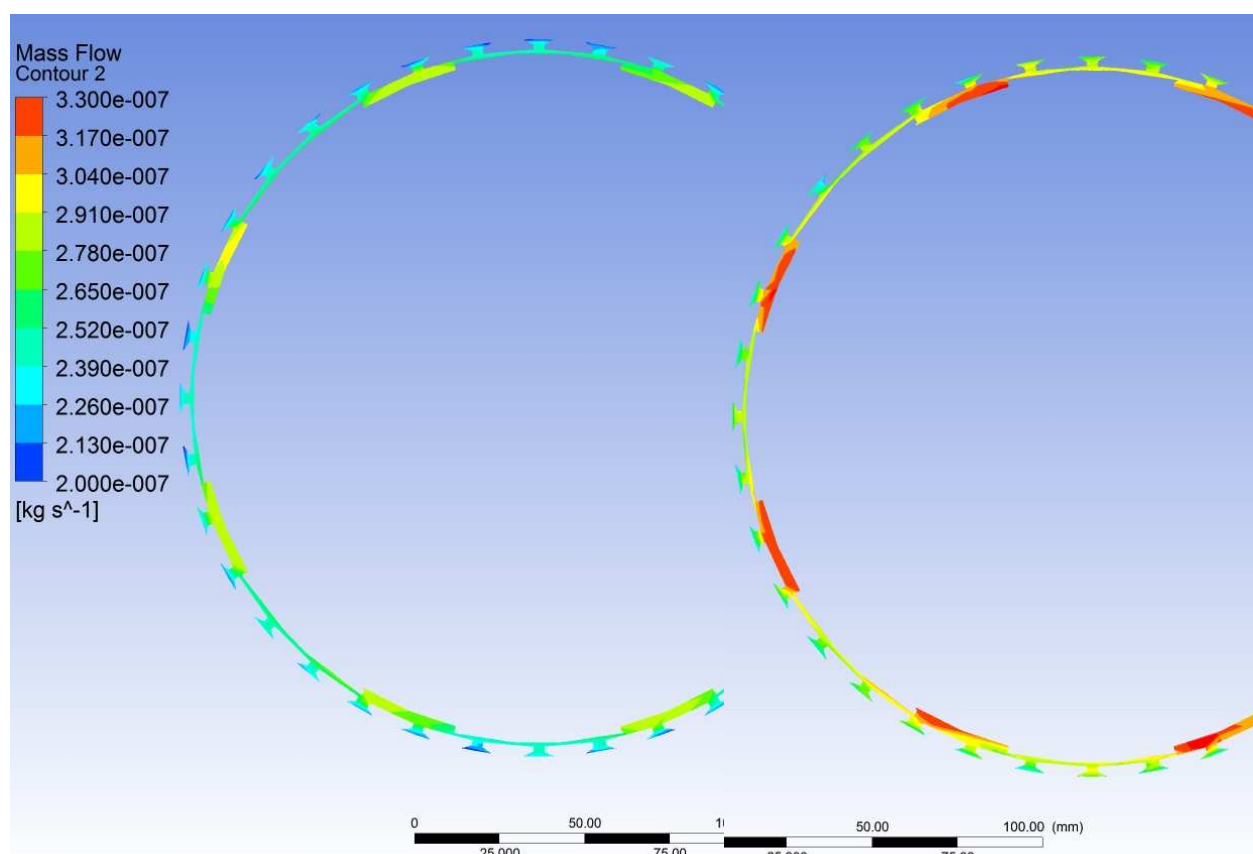
Obr. 4-12 Rozložení hmotnostního toku na ploše ve vzduchové mezeře originálního ventilátoru (vlevo) a ventilátoru s nahrazenou trychtýřovitou částí (vpravo) pro otáčky 3000 min⁻¹

Tento nárůst je pak možné vidět i na Obr. 4-12. Zde je zobrazeno rozložení hmotnostního toku na rovině umístěné ve vzduchové mezeře pro stroj s originálním ventilátorem (na obrázku

vlevo) a ventilátorem s nahrazenou trychtýřovitou (na obrázku vpravo) částí při otáčkách 3000 min^{-1} . Pro oba případy byl zvolen stejný rozsah zobrazovaných hodnot, který zobrazuje legenda. Obrázek s rozložením hmotnostního toku pro ventilátor bez zaoblení u lopatek zde uveden není, protože je v podstatě totožný jako u originálního ventilátoru.

Jak je možné vidět z obrázku, rozložení hmotnostního toku je u obou ventilátorů přibližně stejné. Co je ovšem rozdílné, jsou hodnoty hmotnostního toku v jednotlivých částech. Ty jsou u ventilátoru s nahrazenou trychtýřovitou částí o něco vyšší, na což poukazují převládající červené, oranžové a žluté plochy. Oproti tomu u originálního ventilátoru naopak více převládají oblasti zelené.

Je také v obou případech vidět, že převážná část vzduchu proudí v drážkách rotoru, protože zde v podstatě dochází k rozšíření vzduchové mezery. Tam, kde tohle rozšíření není, je vzduchová mezera široká pouze 1 mm a vzduch tudíž tolik neproudí. Nejmenší proudění je pak v drážkách statoru. Ty jsou sice vyšší než drážky v rotoru, ale jsou zase podstatně užší, a proto tudíž vzduch proudí málo.

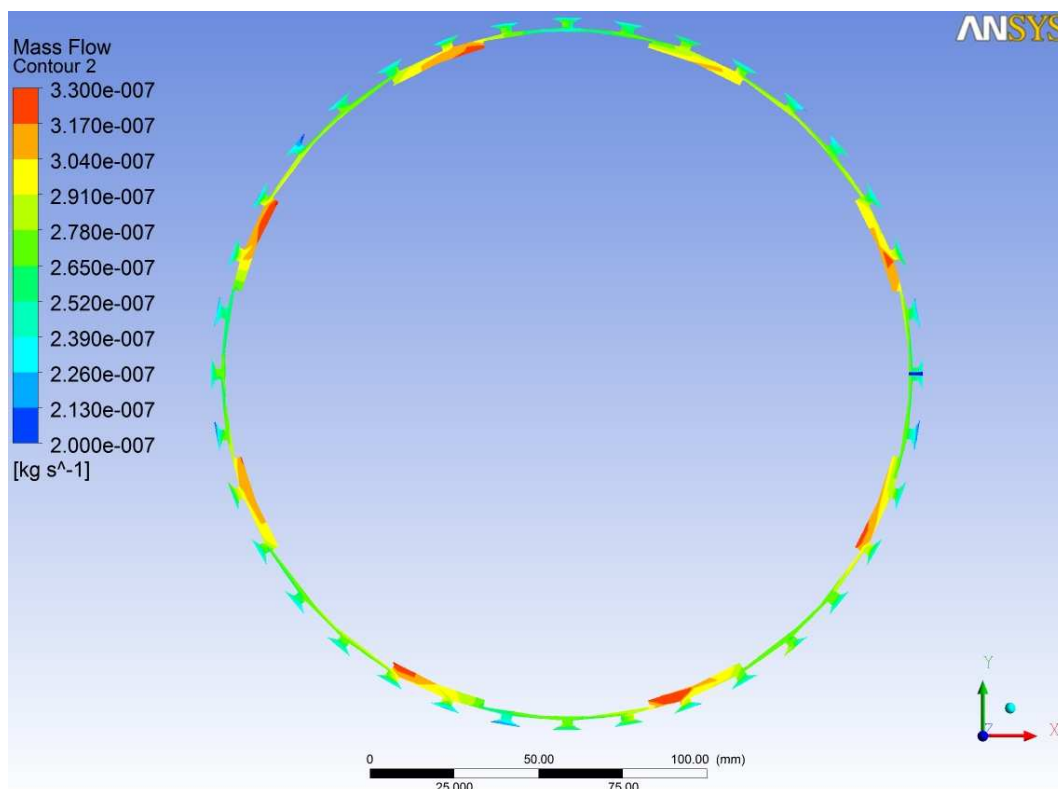


Obr. 4-13 Rozložení hmotnostního toku na ploše ve vzduchové mezeře originálního ventilátoru (vlevo) a ventilátoru s nahrazenou trychtýřovitou částí (vpravo) pro otáčky 600 min^{-1}

Obdobný obrázek jako byl Obr. 4-12 je pak Obr. 4-13, jen s tím rozdílem, že zobrazuje rozložení hmotnostního toku při otáčkách 600 min^{-1} . Opět je zvolen stejný rozsah zobrazení pro oba ventilátory stejný (viz. legenda). I při těchto otáčkách zůstalo rozložení hmotnostního toku pro oba ventilátory stejné, jako tomu bylo při otáčkách 3000 min^{-1} . Změna nastala jen v množství proudícího vzduchu, kterého bylo v případě originálního ventilátoru opět o něco méně.

Pro stroj s ventilátorem bez zaoblených lopatek je rozložení hmotnostního toku také stejné jako v případě předchozích dvou ventilátorů, což je možné vidět na Obr. 4-14. Co se týče

množství proudícího vzduchu přes vzduchovou mezeru, je z obrázku zřejmé, že se stroj s tímto ventilátorem řadí opět doprostřed z analyzované trojice.



Obr. 4-14 Rozložení hmotnostního toku na ploše ve vzduchové mezeře ventilátoru bez zaoblených lopatek pro otáčky 600 min^{-1}

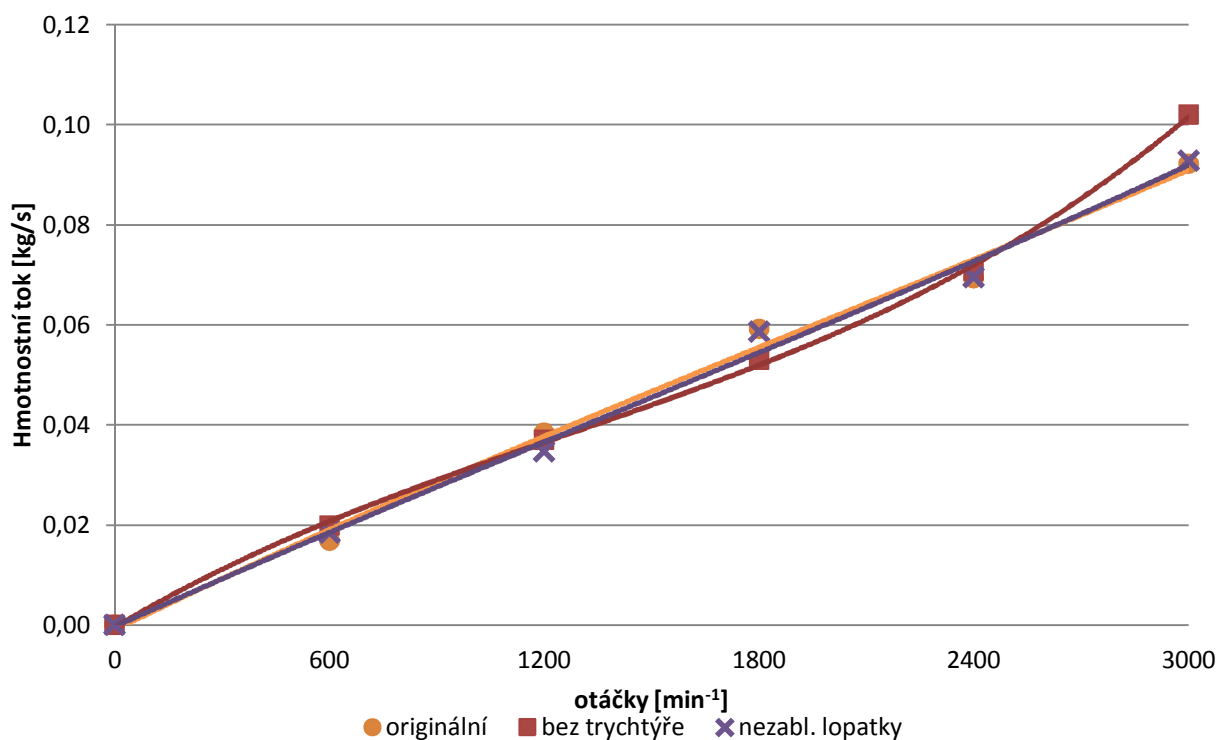
Poslední analyzovanou plochou z hlediska hmotnostního toku vypočteného Ansyssem je plocha u volného konce hřídel, tedy plocha, na které bude zobrazeno proudění přes otvory v krytu generátoru. Dle doposud získaných poznatků by tudy měl být především odváděn vzduch ze stroje, ale samozřejmě je i sání vzduchu dovnitř stroje.

Na Obr. 4-15 jsou zobrazeny závislosti hmotnostního toku vypočteného Ansyssem pro stroje s jednotlivými druhy ventilátorů. Na první pohled vypadají křivky podobně jako křivky pro plochu přes vzduchovou mezeru. Velikosti hmotnostního toku jsou ale oproti zmiňované ploše přes vzduchovou mezeru téměř dvojnásobné. Tato skutečnost ukazuje na nějakou nesrovnalost ve výpočtu, protože pokud se jedná o dokonale utěsněný stroj, kterým vytvořený model je, musí stejný hmotnostní tok do stroje vstupovat a stejný vystupovat.

Zde pravděpodobně došlo k ne úplně šťastně vytvořené výpočetní síti. Napovídá tomu skutečnost, že všechny hodnoty jsou přibližně o 60 % větší než hodnoty na předchozích rovinách. Vzduchová mezera, ale i otvory v krytu ventilátoru, jsou totiž poměrně úzké oproti rozměru celého stroje. Dojde tak k tomu, že komponenta meshing, která výpočetní síť vytváří, zvolí velikost ok sítě podle velikosti celého stroje tak, aby byl výpočet dostatečně přesný. Takto zvolená velikost ok ovšem může být pro úzkou vzduchovou mezeru příliš velká a pravděpodobně i šířka otvorů v krytu ventilátoru. Program pak vytvoří na šířku vzduchové mezery třeba jen jedno oko sítě a to je skutečně málo. Podobně by tomu pak bylo u otvorů v krytu ventilátorů, kde bude na šířku otvoru ok sice více, ale ne dostatečně mnoho tak, aby nedošlo k takovému zkreslení.

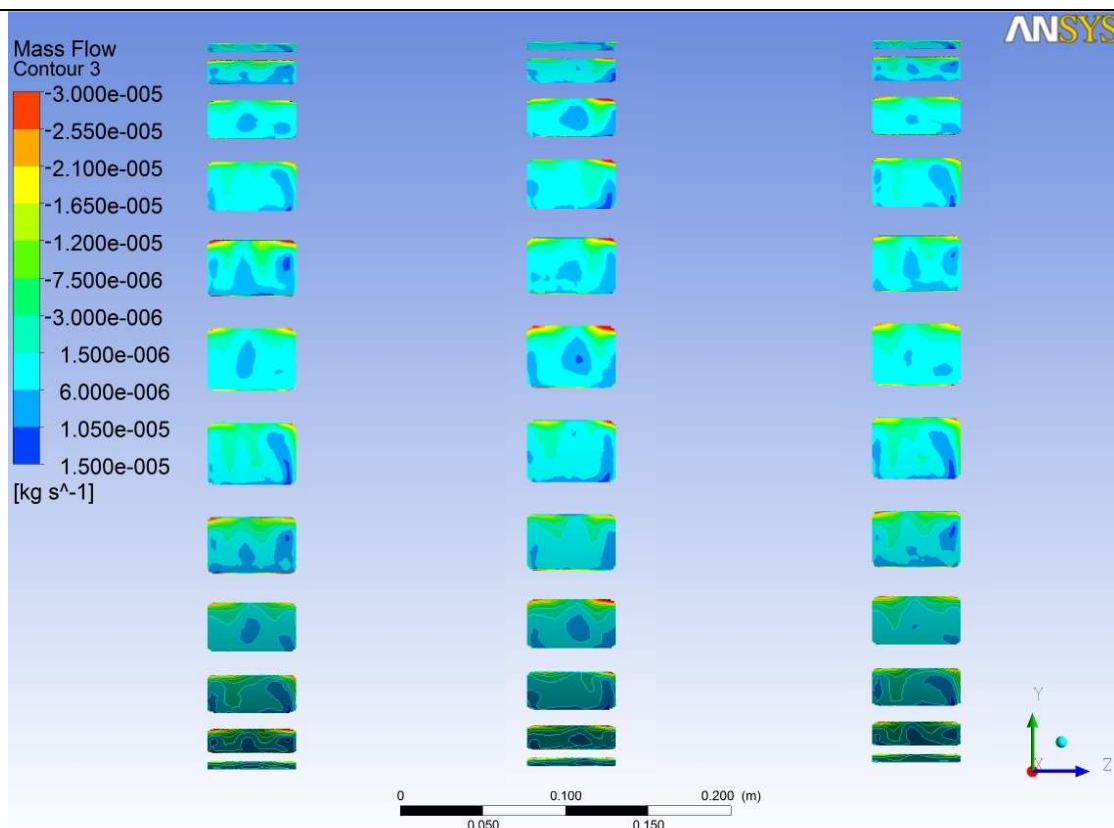
Další možností způsobující takový rozdíl ve výsledcích, může být i silné sání nebo výtlak procházející přes relativně malou plochu. Tím je myšleno, že plocha (přes kterou je sáno nebo vytlačeno) by musela být malá v porovnání s nastavenými oky sítě. Takové sání je možné vidět i na Obr. 4-16. V podstatě se ovšem jedná o stejnou chybu, a to že oka výpočetní sítě jsou příliš velká.

Tato chyba by se samozřejmě dala odstranit nastavením hustější sítě, a to buď v celém stroji, nebo jen patřičných oblastech stroje. První varianta by vedla k velkému nárůstu času potřebného k výpočtu, i k potřebě výkonnějšího hardwaru počítače. Především pak paměti Ram, kterých si program už pro standardní nastavení sítě alokoval i přes 8 GB. Druhá varianta zmírnění chyby výpočtu by sice neznamenal takový nárůst výpočtového času nároků na hardware, ale zase by byla velmi pracná. Pro komplexní posouzení proudění ve stroji se ovšem dá pracovat i se standardním nastavení výpočetní sítě s tím, že se musí brát v potaz, že může nastat právě zmiňovaná chyba.

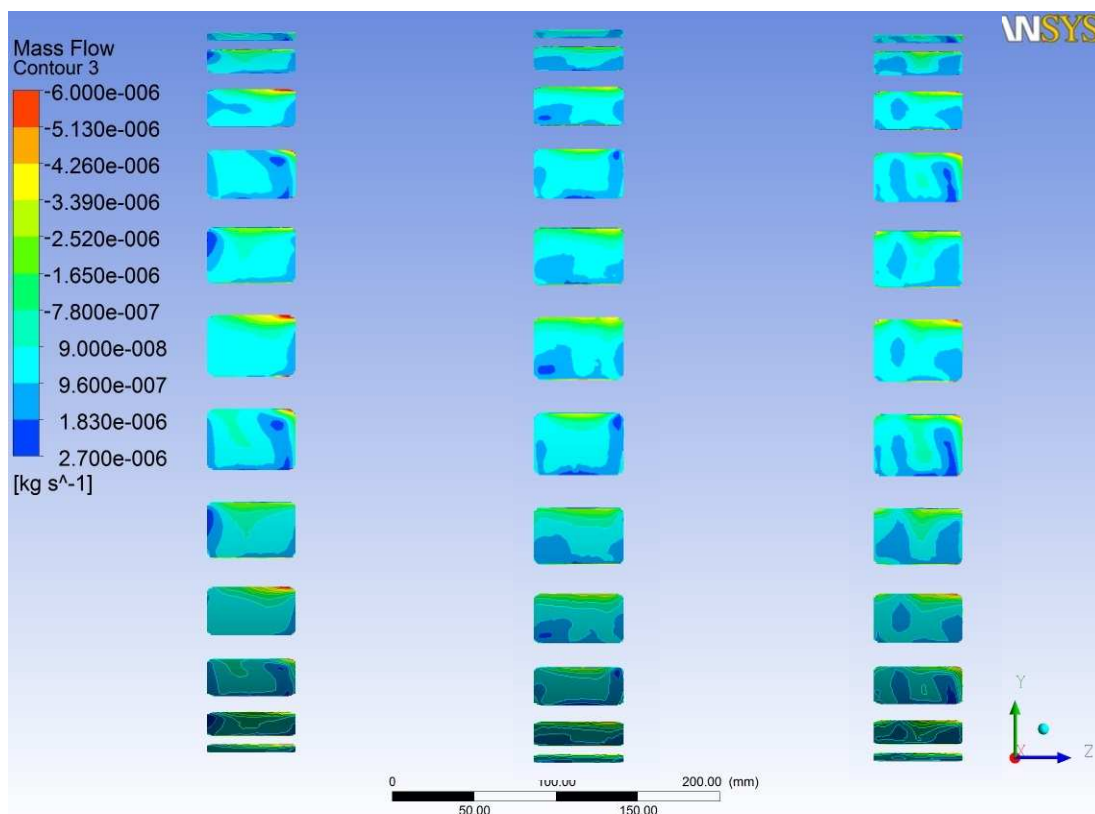


Obr. 4-15 Graf závislosti hmotnostního toku (vypočteného Ansysem) na otáčkách na ploše u volného konce hřídele

Při pohledu na rozložení hmotnostního toku pro otáčky 3000min⁻¹, které je pro všechny druhy ventilátorů uvedeno na Obr. 4-16, zjistíme, že je velmi podobné pro všechny ventilátory. Rozdíly jsou jen v tom, že u každého ventilátoru jsou jinak intenzivní hodnoty výtlaku a sání. Rozmístění, kudy ventilátor saje a vytlačí vzduch, jsou však stejné. Obecně lze tedy říct, že většina plochy otvoru je využívána k poměrně rovnoměrnému výtlaku ohřátého vzduchu ze stroje. Jen v horní části, a především pak v rozích otvoru (z pohledu obrázku tzn. s ventilátorem na pravé straně), dochází k sání vzduchu přes plochu směrem do stroje. Toto sání je sice jen velmi malé, ale za to velmi intenzivní.



Obr. 4-16 Rozložení hmotnostního toku v otvorech u volného konce hřídele zleva u stroje s ventilátorem originální, s nahrazenou trychtýřovitou částí a bez zaoblení lopatek pro 3000 min^{-1}

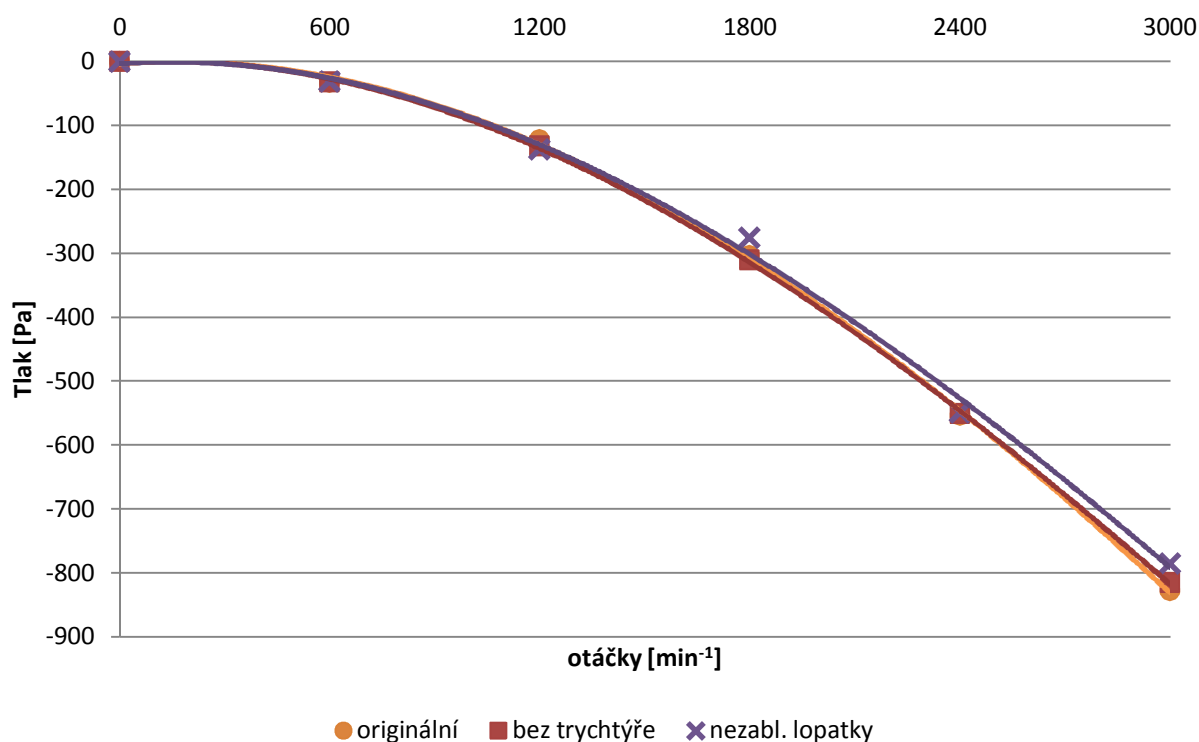


Obr. 4-17 Rozložení hmotnostního toku v otvorech u volného konce hřídele zleva u stroje s ventilátorem originální, s nahrazenou trychtýřovitou částí a bez zaoblení lopatek pro 600 min^{-1}

Při pohledu na rozložení hmotnostního toku na stejné rovině (u volného konce hřídele) pro otáčky 600 min^{-1} (Obr. 4-17) je zřejmé, že oproti otáčkám 3000 min^{-1} se toho moc nezměnilo. Opět je zde větší částí otvorů vzduch vytlačěn ze stroje kromě horních částí otvorů, kde dochází k intenzivnímu sání dovnitř stroje. Rozdíl je pouze v tom, že toto sání se nyní nachází více v pravém rohu, zatímco při otáčkách 3000 min^{-1} bylo toto sání v obou rozích.

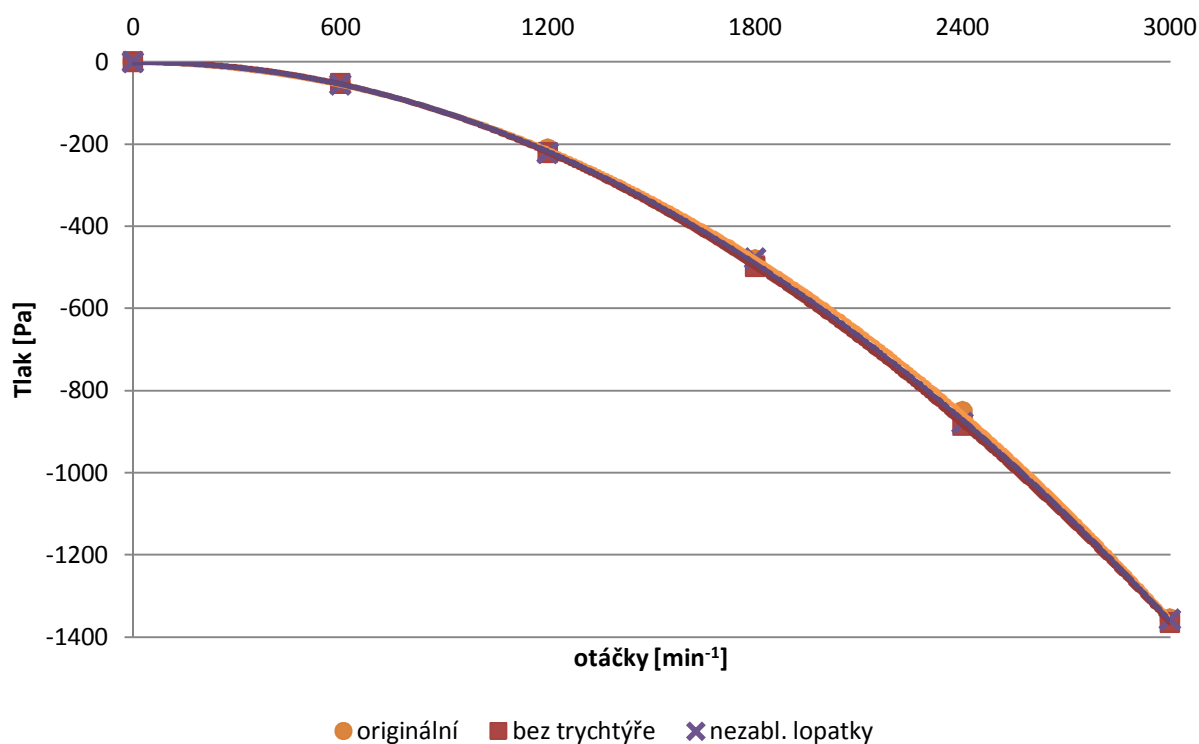
4.2.3 Tlak ve stroji

Po analýze hmotnostního toku byla provedena ještě analýza tlaku ve stroji pro jednotlivé druhy ventilátorů. Při pohledu na graf závislosti tlaku na otáčkách na ploše u ventilátoru je zřejmé, že rozdíly mezi jednotlivými ventilátory z hlediska tlaku jsou ještě menší, než tomu bylo při analýze samotných ventilátorů. Charakteristiky pro jednotlivé ventilátory jsou prakticky totožné s exponenciálním poklesem až k hodnotě kolem -800 Pa při otáčkách 3000 min^{-1} . Jen u stroje s ventilátorem s nahrazenou trychtýřovitou částí je pokles trochu menší.

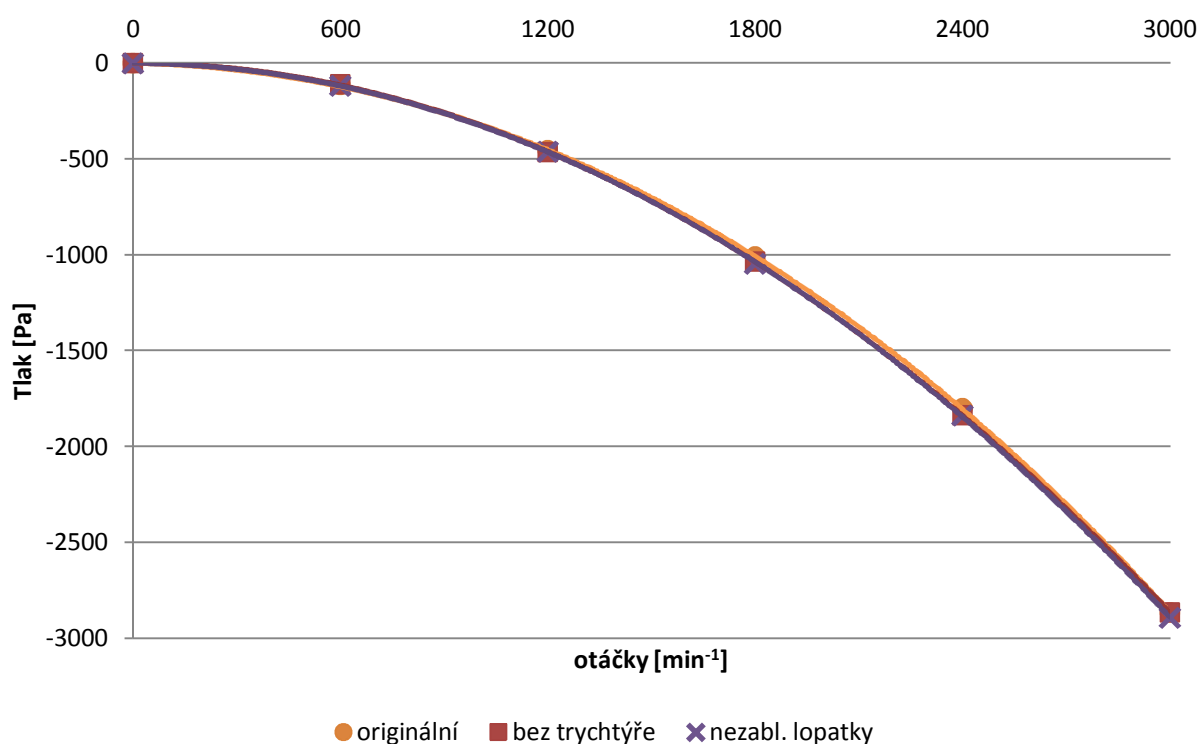


Obr. 4-18 Graf závislosti průměrného totálního tlaku na otáčkách na ploše u ventilátoru

Na ploše ve vzduchové mezeře je pak závislost totálního tlaku na otáčkách velmi podobná jako na ploše u ventilátoru. Exponenciální pokles je opět pro všechny ventilátory téměř totožný, jen tentokrát až k hodnotě téměř -14000 Pa při otáčkách 3000 min^{-1} . Rozdíl hodnot je způsoben tím, že vzduchová mezera je mnohem užší, a tím pádem je zde větší změna tlaku.



Obr. 4-19 Graf závislosti průměrného totálního tlaku na otáčkách na ploše ve vzduchové mezeře

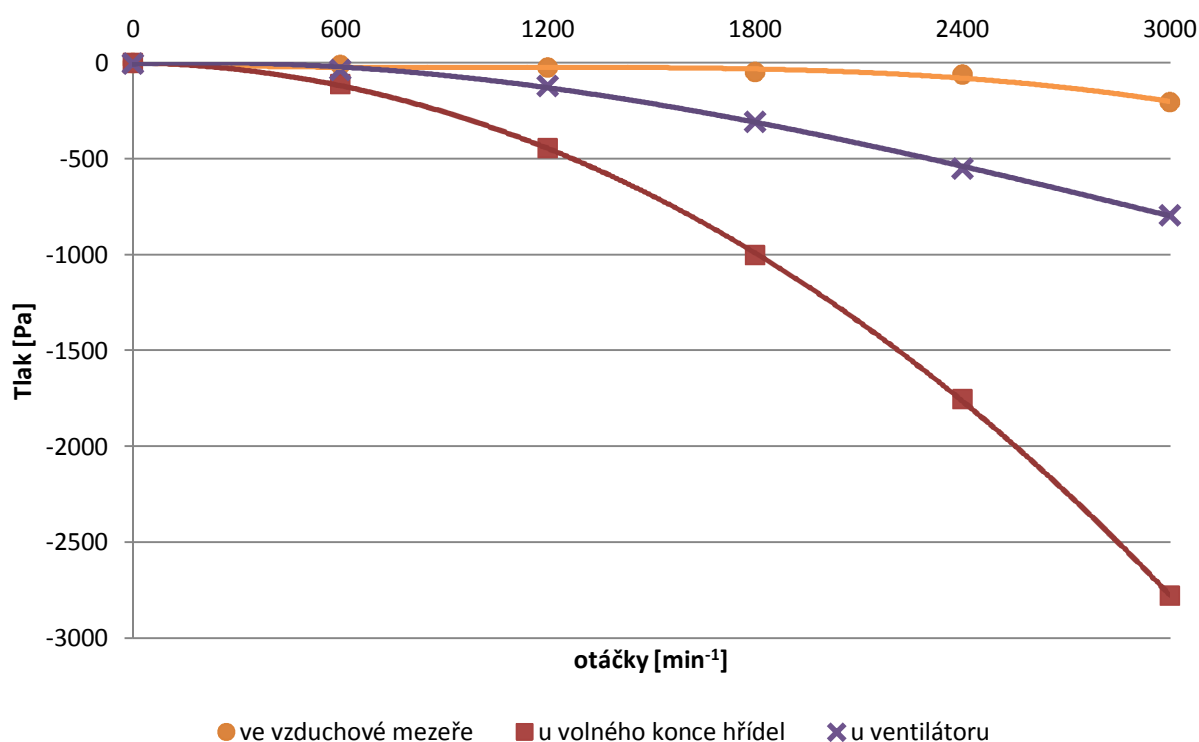


Obr. 4-20 Graf závislosti průměrného totálního tlaku na otáčkách na ploše u volného konce hřídele

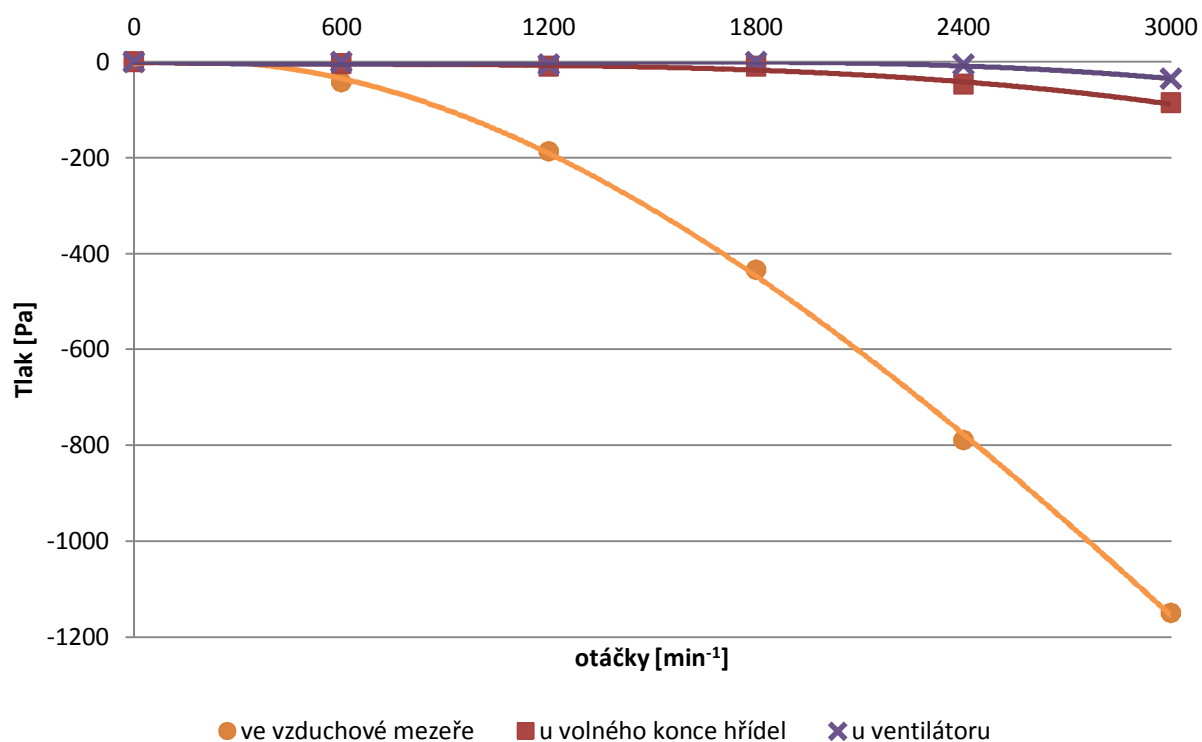
Při pohledu na poslední analyzovanou plochu (u volného konce hřídele- Obr. 4-20) je zřejmé, že exponenciální pokles tlaku s rostoucími otáčkami je i zde pro všechny druhy ventilátorů v podstatě stejný. Jen hodnoty tlaku jsou zde vyšší (resp. nižší) než ve vzduchové

mezeře, kde je úzký profil a dá se zde očekávat největší změna tlaku. Tato velká změna tlaku je zde způsobena velkým dynamickým tlakem, jak ukazuje Obr. 4-21, zatímco statický tlak je zde velmi malý (Obr. 4-22). Naproti tomu ve vzduchové mezeře jsou změny tlaku způsobeny především tlakem statickým a dynamický tlak je minimální.

Tlak na ploše je tedy ovlivněn nejen velikostí plochy, ale také různými druhy proudění. Přes vzduchovou mezeru je proudění poměrně ustálené, a proto je dynamický tlak malý. Naproti tomu na ploše u volného konce hřídele, ale i na ploše u ventilátoru, proudí vzduch velmi různorodě. Dochází zde totiž jak k výtlaku, tak k sání, a samozřejmě i k vzniku turbulencí, což vede k větší změně dynamického tlaku. Především pak na ploše u volného konce hřídel, kde dochází v horní části otvorů k silnému sání úzkou částí (viz. kapitola 4.2.2). Statický tlak ovšem zůstává malý, protože otvory jsou dostatečně velké.



Obr. 4-21 Graf závislosti průměrného dynamického tlaku na otáčkách u stroje s originálním ventilátorem



Obr. 4-22 Graf závislosti průměrného statického tlaku na otáčkách u stroje s originálním ventilátorem

5 ZÁVĚR

Práce byla věnována ventilačním výpočtům v synchronním stroji, a proto byla první část věnována právě synchronnímu stroji, jeho funkci, ztrátám ve stroji, toku výkonu ve stroji a způsobům chlazení. Další část se zabývá přenosům tepla, laminárním a turbulentním prouděním, rozdělením ventilátorů a programem Ansys CFX, který byl pro výpočet proudění používán.

Hlavní část práce je pak rozdělena do dvou kapitol. V první kapitole je analyzován zadaný ventilátor samostatně. Tato metoda byla zvolena kvůli časové náročnosti výpočtu proudění celého synchronního stroje včetně ventilátoru. Naproti tomu výpočty samotného ventilátoru byly až osminásobně rychlejší, což umožnilo získat větší množství výsledků.

Zadaný ventilátor byl nejdříve podroben analýze pro různé počty lopatek, u níž bylo zjištěno, že k zlepšení parametrů ventilátoru dochází pozvolna až k hodnotě devíti lopatek. Následné přidávání lopatek již příliš parametry nezlepší. Protože měl originální (reálný) ventilátor lopatek sedm a rozdíl mezi ventilátorem s devíti a sedmi lopatkami nebyl velký, byl pro další práci ponechán originální ventilátor. U něj pak byly provedeny čtyři modifikace a ty byly podrobeny analýze pro otáčky 3000 min^{-1} . Ze čtyř modifikací byly vybrány dvě, které byly následně spolu s originálním ventilátorem analyzovány pro různé otáčky. Těmito modifikacemi byla náhrada trychtýřovité části ventilátoru za rovnou část, protože ventilátor dosahoval nejlepších výsledků z pohledu hmotnostního toku v radiálním směru a odstranění zaoblení u lopatek, u kterého ventilátor naopak vykazoval nejhorší výsledky z pohledu hmotnostního toku. U ventilátorů byl hmotnostní tok a tlak sledován jak z hlediska množství, tak z hlediska rozložení na dvou pomocných plochách vytvořených pro tyto účely. V práci si je pak možné povšimnout různé orientace legend u těchto zobrazení rozložení. To je z důvodu toho, že některé plochy byly válcové a jiné diskové (kotoučové) a Ansys u každé uvažoval různou polaritu proudění.

Po analýze samotného ventilátoru a jeho modifikací byl vytvořen model strojů se třemi vybranými ventilátory. Ten byl analyzován na třech pomocných vyhodnocovacích plochách, které byly vytvořeny tak aby na nich bylo možné zobrazit proudění přes otvory v krytu ventilátoru, ve vzduchové mezeře a v krytu stroje u volného konce hřídele. Z analýzy vyplynulo, že všechny tři ventilátory jsou na tom z hlediska množství hmotnostního toku a velikosti tlaku velmi podobně, jen při otáčkách 3000 min^{-1} na tom byl ventilátor s nahrazenou trychtýřovitou částí o něco lépe z hlediska velikosti hmotnostního toku. Z hlediska rozložení hmotnostního toku byl pak rozdíl především v otvorech krytu ventilátoru. Především pak opět u ventilátoru s nahrazenou trychtýřovitou částí při otáčkách 3000 min^{-1} . U tohoto ventilátoru totiž docházelo k sání a výtlaku v jiných částech otvorů než u zbývajících strojů. Z hlediska tlaku pak došlo k tomu, že v otvorech u volného konce hřídele došlo k větší změně tlaku než v podstatně užší vzduchové mezeře. Toto bylo způsobeno velkým nárůstem dynamického tlaku, zatímco statický byl malý. V otvorech totiž není tak ustálené proudění jako ve vzduchové mezeře a kombinace výtlaku a sání v jednom otvoru pak způsobují poměrně silný dynamický tlak.



LITERATURA

- [1] ONDRŮŠEK, Čestmír. *Elektrické stroje* [online]. Brno [cit. 2012-03-17].
- [2] PETROV, G.N. *Elektrické stroje - asynchronní stroje, synchronní stroje*. Praha: Academia, 1982.
- [3] ONDRUŠKA, Emil a Antonín MALOUŠEK. *Ventilace a chlazení elektrických strojů točivých*. SNTL - Nakladatelství technické literatury n.p., 1985.
- [4] HAK, Josef a Oldřich OŠLEJŠEK. *Výpočet chlazení elektrických strojů. 1. díl: Fyzikální podklady výpočtu chlazení a ventilační výpočet*. 1. vyd. Brno: VVÚ el. strojů točivých, 1973, 626 s.
- [5] ČERMÁK, Jan. A KOLEKTIV. *Ventilátory*. Praha 1: SNTL - Nakladatelství technické literatury, n.p., 1974. ISBN 04-236-74.
- [6] BLEJCHAŘ, Tomáš. *Návody do cvičení "Modelování proudění" - CFX* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2009 [cit. 2012-03-17]. ISBN 978-80-248-2050-7.
- [7] *Modelování proudění ve vysokém rozlišení*. Praha, 2006. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze, Matematicko - fyzikální fakulta. Vedoucí práce Fuka Vladimír.



PŘÍLOHY

závislosti na otáčkách u generátoru s orig.ventilátorem								
mezikruží mezi rotorem a statorem								
otáčky	rychlost	obj. tok	hm.tok	hmotnostní	tot. tlak	stat. tlak	dyn. tlak	plocha
		z rychlosti	z rychlosti	tok				
min ⁻¹	m·s ⁻¹	m ³ ·s ⁻¹	kg·s ⁻¹	kg·s ⁻¹	Pa	Pa	Pa	m ²
0	0	0	0	0	0	0	0	celková
600	4,846	0,022	0,028	0,0102	-52,92	-42,75	-10,2	0,0045081
1200	10,888	0,049	0,063	0,0230	-212,81	-187,70	-25,1	
1800	16,805	0,076	0,098	0,0355	-481,52	-434,77	-46,8	jen otvoru
2400	23,211	0,105	0,135	0,0490	-850,50	-790,14	-60,4	0,00169279
3000	25,649	0,116	0,149	0,0534	-1356,05	-1150,72	-205,3	
rotační plocha u volného konce hřídele (bez vent.)								
otáčky	rychlost	obj. tok	hm.tok	hmotnostní	tot. tlak	stat. tlak	dyn. tlak	plocha
		z rychlosti	z rychlosti	tok				
min ⁻¹	m·s ⁻¹	m ³ ·s ⁻¹	kg·s ⁻¹	kg·s ⁻¹	Pa	Pa	Pa	m ²
0	0	0	0	0	0	0	0	celková
600	1,402	0,145	0,187	0,0168	-115,48	-4,12	-111,4	0,103672
1200	2,754	0,285	0,368	0,0384	-455,86	-9,74	-446,1	
1800	4,452	0,462	0,595	0,0591	-1010,62	-9,27	-1001,3	jen otvoru
2400	7,660	0,794	1,024	0,0693	-1800,35	-46,57	-1753,8	0,05132337
3000	7,294	0,756	0,975	0,0922	-2866,81	-86,09	-2780,7	
rotační plocha u ventilátoru								
otáčky	rychlost	obj. tok	hm.tok	hmotnostní	tot. tlak	stat. tlak	dyn. tlak	plocha
		z rychlosti	z rychlosti	tok				
min ⁻¹	m·s ⁻¹	m ³ ·s ⁻¹	kg·s ⁻¹	kg·s ⁻¹	Pa	Pa	Pa	m ²
0	0	0	0	0	0	0	0	celková
600	3,731	0,229	0,296	-0,0095	-33,48	-0,31	-33,2	0,0614928
1200	8,632	0,531	0,685	-0,0218	-122,20	-4,87	-117,3	
1800	10,694	0,658	0,848	-0,0313	-303,26	-0,36	-302,9	jen otvoru
2400	13,881	0,854	1,101	-0,0400	-554,40	-5,48	-548,9	0,03917429
3000	19,679	1,210	1,561	-0,0515	-828,57	-35,21	-793,4	

**závislosti na otáčkách u generátoru s ventilátorem bez náběhu**

mezikruží mezi rotorem a statorem								
otáčky	rychlost	obj. tok	hm.tok	hmotnostní tok	tot. tlak	stat. tlak	dyn. tlak	plocha
		z rychlosti	z rychlosti					
min ⁻¹	m·s ⁻¹	m ³ ·s ⁻¹	kg·s ⁻¹	kg·s ⁻¹	Pa	Pa	Pa	m ²
0	0	0	0	0	0	0	0	celková
600	5,526	0,025	0,032	0,0117	-53,47	-47,70	-5,77	0,0045081
1200	10,092	0,045	0,059	0,0211	-220,84	-185,78	-35,06	
1800	14,548	0,066	0,085	0,0302	-499,55	-410,23	-89,31	jen otvoru
2400	19,519	0,088	0,114	0,0404	-885,62	-729,88	-155,74	0,00169279
3000	28,995	0,131	0,169	0,0612	-1365,98	-1271,53	-94,45	
rotační plocha u volného konce hřídele (bez vent.)								
otáčky	rychlost	obj. tok	hm.tok	hmotnostní tok	tot. tlak	stat. tlak	dyn. tlak	plocha
		z rychlosti	z rychlosti					
min ⁻¹	m·s ⁻¹	m ³ ·s ⁻¹	kg·s ⁻¹	kg·s ⁻¹	Pa	Pa	Pa	m ²
0	0	0	0	0	0	0	0	celková
600	1,593	0,165	0,213	0,0198	-112,11	-1,09	-111,02	0,103672
1200	2,557	0,265	0,342	0,0371	-463,15	-16,23	-446,92	
1800	5,468	0,567	0,731	0,0530	-1035,70	-44,08	-991,62	jen otvoru
2400	7,388	0,766	0,988	0,0708	-1838,97	-77,49	-1761,48	0,05132337
3000	7,868	0,816	1,052	0,1020	-2865,99	-94,65	-2771,34	
rotační plocha u ventilátoru								
otáčky	rychlost	obj. tok	hm.tok	hmotnostní tok	tot. tlak	stat. tlak	dyn. tlak	plocha
		z rychlosti	z rychlosti					
min ⁻¹	m·s ⁻¹	m ³ ·s ⁻¹	kg·s ⁻¹	kg·s ⁻¹	Pa	Pa	Pa	m ²
0	0	0	0	0	0	0	0	celková
600	4,090	0,252	0,324	-0,0112	-31,79	-1,05	-30,74	0,0614928
1200	7,874	0,484	0,625	-0,0205	-132,03	-5,36	-126,67	
1800	10,796	0,664	0,856	-0,0327	-310,42	-9,91	-300,51	jen otvoru
2400	14,369	0,884	1,140	-0,0435	-551,43	-17,22	-534,21	0,03917429
3000	19,351	1,190	1,535	-0,0578	-815,81	-12,50	-803,31	



závislosti na otáčkách u generátoru s ventilátorem bez zaobl. lopatek								
mezikruží mezi rotorem a statorem								
otáčky	rychlost	obj. tok	hm.tok	hmotnostní tok	tot. tlak	stat. tlak	dyn. tlak	plocha
		z rychlosti	z rychlosti					
min ⁻¹	m·s ⁻¹	m ³ ·s ⁻¹	kg·s ⁻¹	kg·s ⁻¹	Pa	Pa	Pa	m ²
0	0	0	0	0	0	0	0	celková
600	5,268	0,024	0,031	0,0111	-54,77	-47,32	-7,45	0,0045081
1200	9,845	0,044	0,057	0,0204	-221,26	-183,20	-38,06	
1800	16,135	0,073	0,094	0,0339	-479,39	-419,64	-59,74	jen otvoru
2400	19,913	0,090	0,116	0,0413	-879,74	-733,39	-146,35	0,00169279
3000	25,897	0,117	0,151	0,0540	-1358,01	-1160,37	-197,64	
rotační plocha u volného konce hřídele (bez vent.)								
otáčky	rychlost	obj. tok	hm.tok	hmotnostní tok	tot. tlak	stat. tlak	dyn. tlak	plocha
		z rychlosti	z rychlosti					
min ⁻¹	m·s ⁻¹	m ³ ·s ⁻¹	kg·s ⁻¹	kg·s ⁻¹	Pa	Pa	Pa	m ²
0	0	0	0	0	0	0	0	celková
600	1,465	0,152	0,196	0,0185	-116,03	-4,84	-111,19	0,103672
1200	3,554	0,368	0,475	0,0347	-461,01	-19,69	-441,32	
1800	4,303	0,446	0,576	0,0587	-1045,48	-44,19	-1001,29	jen otvoru
2400	7,395	0,767	0,989	0,0696	-1838,61	-77,25	-1761,36	0,05132337
3000	6,685	0,693	0,894	0,0929	-2893,96	-106,64	-2787,33	
rotační plocha u ventilátoru								
otáčky	rychlost	obj. tok	hm.tok	hmotnostní tok	tot. tlak	stat. tlak	dyn. tlak	plocha
		z rychlosti	z rychlosti					
min ⁻¹	m·s ⁻¹	m ³ ·s ⁻¹	kg·s ⁻¹	kg·s ⁻¹	Pa	Pa	Pa	m ²
0	0	0	0	0	0	0	0	celková
600	4,130	0,254	0,328	-0,0105	-31,05	-0,63	-30,41	0,0614928
1200	7,420	0,456	0,589	-0,0209	-136,92	-4,49	-132,43	
1800	12,567	0,773	0,997	-0,0332	-275,45	-4,39	-271,06	jen otvoru
2400	14,700	0,904	1,166	-0,0419	-548,97	-17,52	-531,45	0,03917429
3000	21,164	1,301	1,679	-0,0514	-785,26	-33,52	-751,74	